

Note: Cette traduction a été établie par le Greffe à des fins internes et n'a aucun caractère officiel

**COUR INTERNATIONALE DE JUSTICE**

**AFFAIRE RELATIVE À LA CONSTRUCTION D'UNE ROUTE AU COSTA RICA  
LE LONG DU FLEUVE SAN JUAN**

**(NICARAGUA c. COSTA RICA)**

**CONTRE-MÉMOIRE DÉPOSÉ PAR LE COSTA RICA**

**VOLUME II**

**ANNEXES 1 à 10**

**19 décembre 2013**

*[Traduction du Greffe]*



## LISTE DES ANNEXES

### VOLUME II

Annexe	Document	Page
RAPPORTS TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX		
1	Université du Costa Rica, Centre de recherche pour le développement durable, département du génie civil, «Rapport de suivi systématique sur site de l'érosion et de l'apport sédimentaire le long de la route 1856», septembre 2013	1
2	Commission pour le développement forestier (CODEFORSA) de San Carlos, services de conseil pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras, «Rapport d'activités destiné au ministère des affaires étrangères de la République du Costa Rica» (extrait), janvier 2013	21
3	Allan Astorga G. et Andreas Mende, «Route 1856 : analyse de l'évolution de l'utilisation des terres d'après les images satellite prises avant et après la construction de la route frontalière», août 2013	34
4	Régie costa-ricienne d'électricité (Instituto costarricense de Electricidad, ICE), projets d'exploitation stratégique et services associés, Centre d'études fondamentales en ingénierie, service de l'hydrologie, «Rapport sur l'hydrologie et les sédiments des bassins hydrographiques costa-riciens dont les eaux sont drainées par le fleuve du San Juan», août 2013	57
5	Andreas Mende, Allan Astorga G. et Olivier Chassot, route frontalière 1856 : examen des 54 sites où aurait été constaté le dépôt direct de sédiments, selon M. Mathias Kondolf, septembre 2013	208
6	Andreas Mende et Allan Astorga, «Inventaire des pentes et cours d'eau liés à la route frontalière 1856 entre la borne II et Delta Costa Rica», octobre 2013	280
7	Rapport portant la référence DVM-293-2013 en date du 8 octobre 2013 adressé au ministre des affaires étrangères du Costa Rica, M. Enrique Castillo Barrantes, par la vice-ministre de l'environnement du Costa Rica, Mme Ana Lorena Guevara Fernández	286
8	Conseil national des autoroutes (CONAVI), programme de consolidation et d'amélioration continue de la route 1856, réf. DIE-02-13-3107, 25 octobre 2013	295
9	Colin Thorne, «Rapport sur le risque de dommages irréversibles au fleuve San Juan lié à la construction de la route frontalière au Costa Rica», novembre 2013	323
10	Costa Rica, Centre de sciences tropicales (Centro científico tropical, CCT) diagnostic de l'impact sur l'environnement route 1856 — Volet écologique du projet — novembre 2013	359

## LISTE DES ANNEXES

### VOLUME II

Annexe	Document	Page
RAPPORTS TECHNIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX		
1	Université du Costa Rica, Centre de recherche pour le développement durable, département du génie civil, «Rapport de suivi systématique sur site de l'érosion et de l'apport sédimentaire le long de la route 1856», septembre 2013	1
2	Commission pour le développement forestier (CODEFORSA) de San Carlos, services de conseil pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras, «Rapport d'activités destiné au ministère des affaires étrangères de la République du Costa Rica» (extrait), janvier 2013	21
3	Allan Astorga G. et Andreas Mende, «Route 1856 : analyse de l'évolution de l'utilisation des terres d'après les images satellite prises avant et après la construction de la route frontalière», août 2013	34
4	Régie costa-ricienne d'électricité (Instituto costarricense de Electricidad, ICE), projets d'exploitation stratégique et services associés, Centre d'études fondamentales en ingénierie, service de l'hydrologie, «Rapport sur l'hydrologie et les sédiments des bassins hydrographiques costa-riciens dont les eaux sont drainées par le fleuve du San Juan», août 2013	57
5	Andreas Mende, Allan Astorga G. et Olivier Chassot, route frontalière 1856 : examen des 54 sites où aurait été constaté le dépôt direct de sédiments, selon M. Mathias Kondolf, septembre 2013	208
6	Andreas Mende et Allan Astorga, «Inventaire des pentes et cours d'eau liés à la route frontalière 1856 entre la borne II et Delta Costa Rica», octobre 2013	280
7	Rapport portant la référence DVM-293-2013 en date du 8 octobre 2013 adressé au ministre des affaires étrangères du Costa Rica, M. Enrique Castillo Barrantes, par la vice-ministre de l'environnement du Costa Rica, Mme Ana Lorena Guevara Fernández	286
8	Conseil national des autoroutes (CONAVI), programme de consolidation et d'amélioration continue de la route 1856, réf. DIE-02-13-3107, 25 octobre 2013	295
9	Colin Thorne, «Rapport sur le risque de dommages irréversibles au fleuve San Juan lié à la construction de la route frontalière au Costa Rica», novembre 2013	323
10	Costa Rica, Centre de sciences tropicales (Centro científico tropical, CCT) diagnostic de l'impact sur l'environnement route 1856 — Volet écologique du projet — novembre 2013	359

## ANNEXE 1

### **Université du Costa Rica, Centre de recherche pour le développement durable, département du génie civil, «Rapport de suivi systématique sur site de l'érosion et de l'apport sédimentaire le long de la route 1856», septembre 2013**

Le présent document a été préparé par le personnel du Centre de recherche en développement durable de l'Universidad de Costa Rica (dont l'acronyme espagnol est CIEDES), sous la direction de M. Rafael Oreamuno (ing.) et conformément à la répartition des responsabilités présentées ci-après.

**Relevés effectués sur le terrain :** Carlos Aguilar, Rafael Oreamuno et Roberto Villalobos.

**Exploitation des échantillons de sédiments :** Mauricio Mendoza et Luis Diego Ramírez.

**Analyses et élaboration du rapport :** Rafael Oreamuno et Roberto Villalobos.

**Agent administratif du CIEDES :** Marco Arias, (M.A.P.).

M. Rafael Oreamuno (M.Ing.) est ingénieur spécialiste en génie civil, inscrit au Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos du Costa Rica (numéro d'immatriculation : IC-2423), professeur au département du génie civil de l'Universidad de Costa Rica depuis 1987, et consultant privé ; il assume actuellement la charge de directeur du CIEDES. Il a obtenu les diplômes suivants :

— Licenciado en Ingeniería Civil à l'Universidad de Costa Rica, 1980.

— Maîtrise en génie en potamotechnie et hydrologie à la University of New Brunswick (Canada), 1983.

Marco Arias (M.A.P.) est l'agent administratif du CIEDES. À ce titre, il a coordonné la logistique et le transport pour toutes les visites.

Carlos Aguilar, Mauricio Mendoza, Luis Diego Ramírez et Roberto Villalobos sont étudiants en dernière année de génie civil à l'Universidad de Costa Rica ; ils travaillent comme assistants pour le CIEDES. Ils ont tous de l'expérience au laboratoire d'analyse des sols, acquise dans le cadre du programme de génie civil standard. Le programme de génie civil de l'Universidad de Costa Rica est considéré comme fondamentalement semblable par le Bureau canadien d'agrément des programmes de génie. L'agrément «fondamentalement semblable» signifie que le programme de génie civil de l'Universidad de Costa Rica respecte toutes les normes internationales définies dans l'Accord de Washington pour la formation des ingénieurs civils.

## TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
Introduction .....	3
Estimation de l'apport solide.....	4
Erosion en nappe .....	4
Erosion des talus de déblai.....	5
Erosion des talus de remblai de la route.....	6
Rigoles .....	7
Répartition et classification des tailles de sédiments .....	9
Talus de déblai .....	10
Piège à sédiments n° 2.....	10
Piège à sédiments n° 3.....	12
Piège à sédiments n° 4.....	12
Résumé de la taille des sédiments et des résultats relatifs aux limites.....	14
Contrastes entre les formes, les éléments déclencheurs et les processus de l'érosion par	
glissement de terrain et en ravins .....	14
Glissements de terrain.....	14
Ravins .....	15
Contrastes entre l'érosion par glissement de terrain et l'érosion en ravins.....	15
Conclusions .....	16
Bibliographie.....	18
Annexe I – Configuration du piège à sédiments n° 2 .....	19

## Introduction

Le Centre de recherche en développement durable de l'Universidad de Costa Rica (dont l'acronyme espagnol est CIEDES) a été prié d'évaluer le taux d'érosion annuel moyen et les profondeurs moyennes d'érosion depuis la plateforme de la route, les talus de déblai et les talus de remblai sur la route 1856 au Costa Rica. Pour fournir cette évaluation, le personnel du CIEDES a surveillé plusieurs sites entre le 8 juin et le 17 août 2013. Parmi ces sites, mentionnons les deux plus grands glissements rotationnels et trois ravins d'érosion présents sur le tronçon de route ralliant la borne frontière II à la rivière Infiernito (qualifié de zone d'étude), un piège à sédiments qui recueille des substances issues des talus de déblai et témoigne uniquement d'un phénomène d'érosion en nappe, ainsi qu'un talus qui présentait une formation très importante de rigoles. L'emplacement de chaque site est indiqué sur la figure 1.

Pendant la préparation du présent rapport, nous avons examiné le rapport préparé par G. Mathias Kondolf et intitulé «Environmental Impacts of Juan Rafael Mora Porras Route 1856, Costa Rica, on the Rio San Juan, Nicaragua», décembre 2012, Annexe 1 du mémoire du Nicaragua dans l'affaire *Construction d'une route* (le rapport Kondolf).

Les conditions météorologiques (répertoriées dans le tableau 1) ont varié entre les cinq visites, à mesure que la saison des pluies s'intensifiait dans la région. Les deux premières visites ont eu lieu dans des conditions modérées, le ciel étant partiellement nuageux. Au cours de la première visite, il est tombé une averse de pluie brève, bien que forte. Les troisième et quatrième visites, en juillet et en août, ont eu lieu alors que la couverture nuageuse était épaisse et les chutes de pluie abondantes ; une bruine constante tombait ces deux jours-là, interrompue par de fortes averses. Au cours de la dernière visite, les conditions météorologiques étaient ensoleillées et sèches et le sol était visiblement sec.

**Tableau 1.** Dates des visites sur site et conditions météorologiques.

Numéro de la visite	Date	Conditions météorologiques
1	8 juin 2013	Partiellement nuageux, une seule averse
2	23 juin 2013	Partiellement nuageux
3	22 juillet 2013	Couvert, pluvieux
4	17 août 2013	Nuageux, pluvieux
5	21 septembre 2013	Ensoleillé, sec

Parmi les sites sélectionnés, l'on compte certains des talus les plus fortement érodés de la zone d'étude. Toutefois, la plupart des talus et des remblais de la zone d'étude ont été protégés à l'aide de géotextile et végétalisés ou (lorsque c'était possible) reboisés, et subissent désormais beaucoup moins d'érosion que les sites sélectionnés pour l'étude.

Les sites sélectionnés représentent donc les pires exemples d'érosion par glissement de terrain, d'érosion en nappe, d'érosion en rigoles et d'érosion en ravins existant le long de la route 1856. À ce titre, les dimensions des traces d'érosion mesurées sur chaque site, ainsi que les taux annuels d'abaissement de la surface du sol estimés sur la base de ces observations directes sont bien plus élevés que la moyenne pour la route 1856 dans son ensemble. Par conséquent, les taux de l'érosion présentés ici sont hautement conservateurs lorsqu'ils sont appliqués au reste de la route 1856.

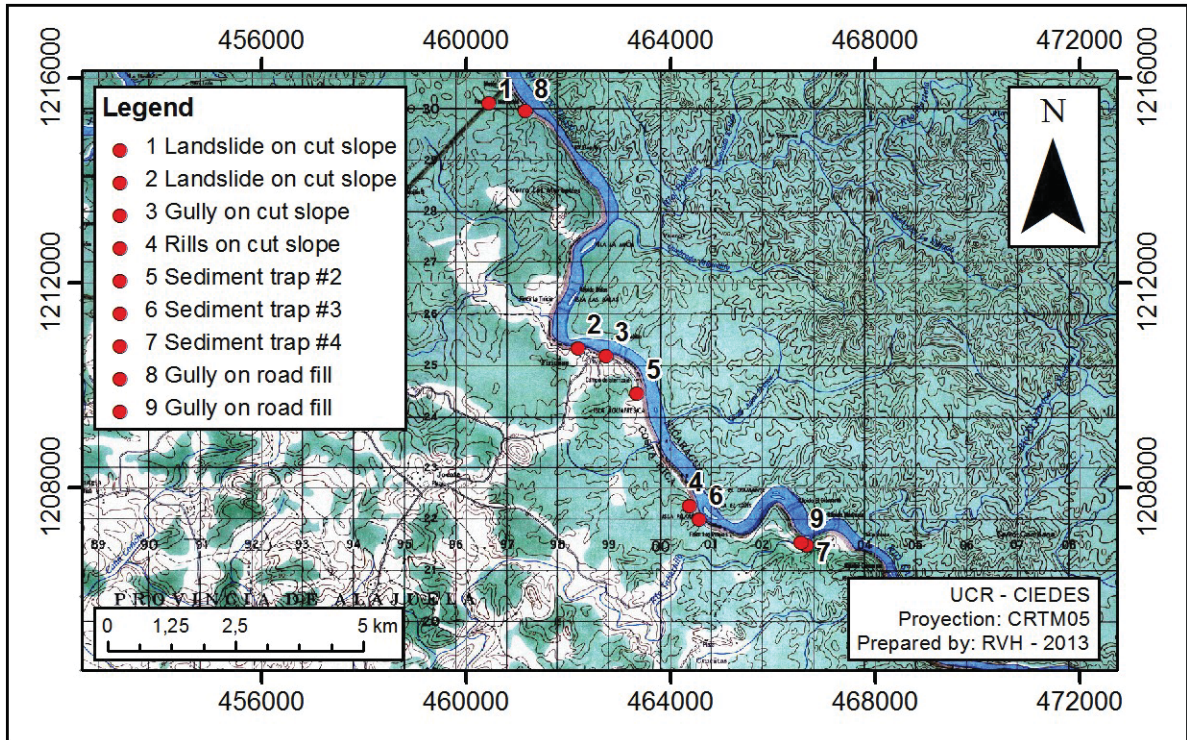


Figure 1. Emplacement des sites surveillés.

### Estimation de l'apport solide

L'analyse de chacun des sites surveillés est détaillée ci-après ; les résultats sont donnés sous la forme d'un taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol ou de profondeur moyenne de l'érosion, selon le type de site.

### Erosion en nappe

Le piège à sédiments n° 2, présenté à la figure 2, a été utilisé pour fournir une estimation de l'érosion en nappe présente sur la plateforme de la route et les talus de déblai. La profondeur des sédiments piégés dans la zone confinée par une géomembrane (figure 2) a été mesurée sur seize points maximum. Ces mesures ont ensuite été combinées à la surface du piège afin d'estimer le volume de sol érodé depuis l'aire tributaire du piège. Enfin, le volume érodé a été divisé par l'aire tributaire afin de déterminer la profondeur moyenne de sol perdu chaque jour. Ce résultat a été multiplié par le nombre de jours dans une année afin de déterminer le taux d'érosion annuel moyen présenté dans le tableau 2. Le piège est situé aux coordonnées suivantes : 10°56'26.2"N, 84°20'6.9"W.

Deux types de surfaces s'écoulent dans le piège à sédiments : un talus de terre nue de 505,0 mètres carrés et une portion de la surface de la route de 332,0 mètres carrés. La surface du piège elle-même mesure 58,5 mètres carrés.



**Tableau 2.** Observations sur le terrain des sédiments présents dans le piège à sédiments n° 2.

Date	Profondeur moyenne (en m)	Volume estimé (en m <sup>3</sup> )	Variation du volume (en m <sup>3</sup> )	Taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol (en m/an)
08/06/2013	0,18	10,70	s.o.	s.o.
23/06/2013	0,22	12,81	2,11	0,061
22/07/2013	0,33	19,11	6,30	0,095
17/08/2013	0,32	18,47	-0,64	-0,011

Le taux annuel estimé entre le 22 juillet et le 17 août 2013 est négatif, en raison d'une réduction d'un centimètre de la profondeur moyenne des sédiments. Il est peu probable que le volume déposé dans le piège ait diminué pendant cette période ; il est plus vraisemblable que le piège ait été plein entre les dates susmentionnées. Comme indiqué à la figure 2, le piège était presque plein le 22 juillet. La différence de profondeur peut alors s'expliquer par une marge d'erreur dans les mesures de la profondeur des sédiments d'une magnitude de +/- 0,01 m.

Concernant la différence entre les taux annuels moyens du 8 juin et du 22 juillet, ceux-ci peuvent s'expliquer par une augmentation des précipitations au début de la saison des pluies. L'estimation de 9,5 cm/an représente des conditions enregistrées pendant les mois humides de l'année, tandis que le taux d'érosion plus faible mesuré entre juin et juillet est représentatif des conditions de la saison sèche, car la quantité de précipitations érodant les déblais et remblais de la route est moindre. Par conséquent, il est conclu que l'utilisation de la mesure de 9,5 cm/an pour représenter le taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol est conservatrice, car elle applique les taux estimés pendant la saison des pluies à l'année entière.



**Figure 2.** Piège à sédiments n° 2 le 8 juin (à gauche) et le 22 juillet (à droite).

### Erosion des talus de déblai

Comme indiqué ci-dessus, la surface qui s'écoule dans le piège à sédiments témoigne uniquement d'une érosion en nappe. Trois talus de déblai, deux présentant un glissement de terrain et le dernier un ravin, ont été étudiés afin d'établir leur profondeur moyenne d'érosion. Le site n° 1 présente un glissement de terrain dont la profondeur moyenne est égale à 2,96 m et touche une surface de 150 m<sup>2</sup>. Le glissement de terrain du site n° 2 est plus modeste ; sa profondeur moyenne est égale à 1,01 m et la surface érodée mesure 80 m<sup>2</sup>. Pour finir, le ravin du site n° 3 présente une profondeur moyenne de 0,43 m et s'étend sur 14 m<sup>2</sup>. Grâce à ces renseignements, nous avons obtenu un volume érodé pour chaque site, que nous avons ensuite réparti sur l'ensemble de la surface des talus afin de calculer la profondeur moyenne d'érosion pour chaque talus. Les résultats des mesures réalisées sur chaque site sont présentés dans le tableau 3.

Les résultats ci-après présentent tout d'abord une profondeur moyenne pour le talus, et non pas un taux annuel, car, contrairement au piège à sédiments, la taille des sites d'érosion étudiés n'a pas vraiment évolué au cours des cinq visites effectuées sur la route entre le 8 juin et le 21 septembre 2013. Etant donné que les mesures sont restées constantes pendant cette période, il est impossible de calculer un taux d'érosion comme nous l'avons fait pour le piège à sédiments. Une fois rassemblées, les profondeurs moyennes des sites présentant un glissement de terrain et du site présentant un ravin, observées sur les trois talus, sont égales à 0,17 mètre ; elles occupaient par ailleurs 8,6 % de la surface totale des talus.

Pour estimer un taux annuel pour ces talus, il est raisonnable de supposer qu'ils ont été créés lors de la construction de la route 1856, en 2011 ; ils ont donc deux ans. Cette information supposerait un taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol dans la zone du talus dans son ensemble d'environ 0,085 m/an (c.-à-d. 8,5 cm/an). Néanmoins, comme indiqué ci-dessus, il ne convient pas de combiner les glissements de terrain et les ravins pour en faire une caractéristique géomorphologique uniforme. La profondeur moyenne d'érosion de chaque caractéristique apparaît de manière distincte dans les conclusions du présent document.

**Tableau 3.** Profondeur moyenne d'érosion dans les talus présentant des glissements de terrain ou des ravins.

N° du Site	Coordonnées GPS	Type de caractéristique	Surface (en m <sup>2</sup> )	Type d'érosion	Surface érodée (en m <sup>2</sup> )	Surface érodée/surface de la caractéristique (en %)	Profondeur moyenne d'érosion (en m)	Taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol (en m/an)
1	10° 59'31.9"N	Déblai de la route	756	Glissement rotationnel	80	10,58	0,11	0,06
	84° 21' 44.0"W							
2	10° 56' 56.2"N	Déblai de la route	1 168	Glissement rotationnel	150	12,84	0,38	0,19
	84° 20' 46.1"N							
3	10° 56' 51.1"N	Déblai de la route	612	Ravin	14	2,29	0,01	0,005
	84° 20' 25.9"W							

### Erosion des talus de remblai de la route

Outre les talus de déblai étudiés, deux remblais de la route présentant une érosion en ravins ont été échantillonnés. Ces deux sites n'avaient pas été intégrés aux sites d'origine, car ils ne présentaient pas de signes d'érosion lors d'une visite préliminaire effectuée pendant la saison sèche en 2013. Les mesures réalisées sur ces sites ont eu lieu au cours des visites de juin et de juillet. Toutefois, les mesures finales ont été effectuées pendant la visite de septembre. Ces sites ont été intégrés dans l'étude afin d'éviter d'utiliser les mêmes taux d'érosion pour les déblais et les remblais de la route, en raison de l'origine différente de ces caractéristiques. Par essence, le sol où se trouvent les déblais de la route a été déposé et compacté au fil du temps par des processus naturels. Les remblais de la route sont des dépôts effectués par l'homme. Cette différence d'origine entraîne différentes propriétés, notamment concernant leur sensibilité à l'érosion.

Le site n° 8 correspond à un ravin qui s'est formé en raison de la circulation de l'eau à la surface de la route et sur le remblai. Lors de la visite de juin, les matériaux plus meubles du talus de remblai étaient érodés jusqu'au bord de la surface de la route. Toutefois, le matériau grossier de la route semble avoir empêché toute érosion régressive supplémentaire près du ravin. Par ailleurs, aucune augmentation de la taille n'a été enregistrée lors de la visite de juillet. Ce ravin s'étend sur 121 m<sup>2</sup> et sa profondeur moyenne est égale à 1,5 m. Dans ce cas, nous savons que l'érosion sur ce site a commencé après la visite effectuée pendant la saison sèche, c'est-à-dire environ six mois avant la visite de septembre. Par conséquent, le taux annuel moyen d'abaissement de la surface peut être estimé si l'on double la profondeur moyenne d'érosion mesurée sur six mois. Ces deux chiffres sont présentés dans le tableau 4.



Le site n° 9 est un remblai de la route dont la surface grossière a été supprimée ; il présente 16 ravins individuels de diverses tailles. Parmi eux, le plus grand ravin a été sélectionné pour être mesuré. Il s'étend sur 7,36 m<sup>2</sup> et présente une profondeur d'érosion de 1 m, ce qui nous donne un volume érodé de 7,36 m<sup>3</sup>. Ce volume a alors été multiplié de façon conservatrice par le nombre de ravins présents dans le remblai pour donner une estimation de l'érosion totale en ravins, égale à 118 m<sup>3</sup> pour l'ensemble du remblai. La surface érodée par les ravins est d'environ 118 m<sup>2</sup>. Lorsqu'on la divise par la surface totale du talus de remblai, l'on obtient une profondeur moyenne d'érosion de 0,10 m. Pour finir, étant donné que ces mesures ont été réalisées au cours des mêmes six mois que ceux utilisés ci-dessus, le taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol pour le talus de remblai a été estimé au double du chiffre mesuré sur six mois, ce qui nous amène à une estimation de 0,20 m/an.

**Tableau 4.** Profondeur moyenne d'érosion dans les talus de remblai présentant des glissements de terrain ou des ravins.

N° du Site	Coordonnées GPS	Type de caractéristique	Surface (en m <sup>2</sup> )	Type d'érosion	Surface érodée (en m <sup>2</sup> )	Surface érodée/surface de la caractéristique (en %)	Profondeur moyenne d'érosion (en m)	Taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol (en m/an)
8	10°59'27.0"N 84°21'19.8"W	Remblai de la route	3 080	Ravin	121	3,93	0,06	0,12
9	10°54'52.9"N 84°18'21.8"W	Remblai de la route	1 183	Ravin	118	9,97	0,10	0,20

### Rigoles

Une méthode d'analyse spatiale a été utilisée pour estimer la quantité de sol perdu en raison de l'érosion en rigoles pendant la période de surveillance et, par conséquent, pour évaluer la profondeur moyenne d'érosion pour les talus présentant des rigoles. Des mesures de la hauteur, de la profondeur et de la largeur ont été réalisées sur une section d'un mètre de hauteur dans une grande rigole située sur le talus de remblai présentant l'érosion en rigoles la plus importante du tronçon de route étudié. La section mesurée présentait une largeur de 0,3 m et une profondeur de 0,6 m, qui, associées à la hauteur et à la configuration triangulaire de la rigole, équivalent à un volume de 0,090 m<sup>3</sup> de perte de sol pour cette section. Le talus étudié se trouve aux coordonnées suivantes : 10° 55' 15.9"N, 84° 19' 33.4"W.

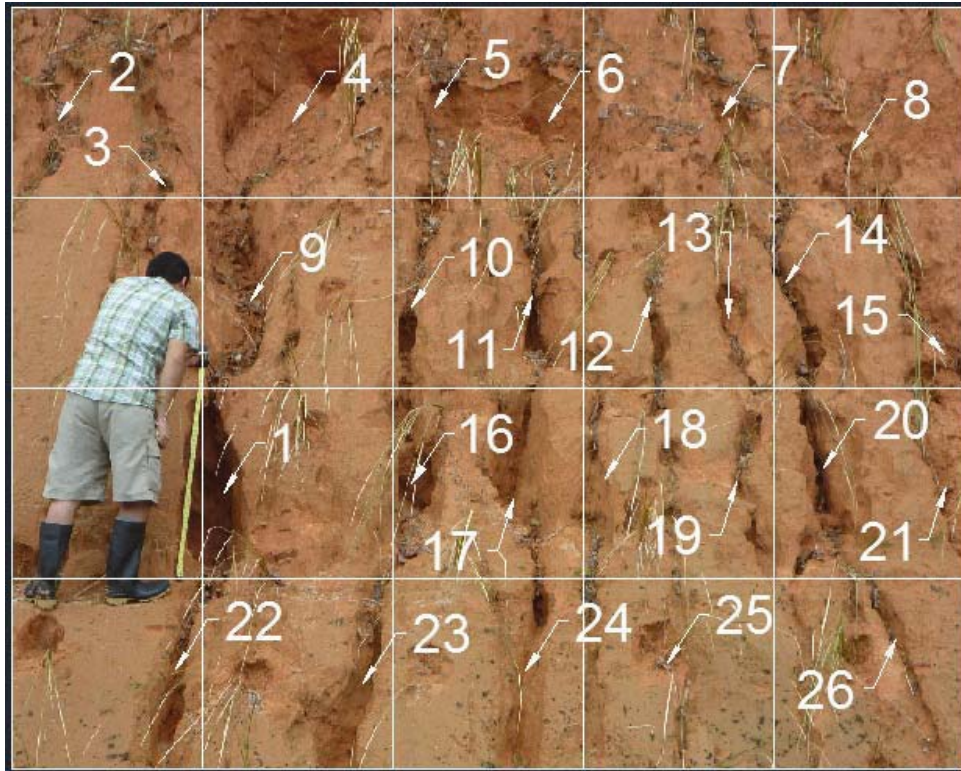
Une photographie prise le 17 août 2013 (figure 3) a ensuite été utilisée avec le volume calculé ci-dessus pour estimer le volume de perte de sol par unité de surface du talus. Pour ce faire, la photographie a été mise à l'échelle à l'aide du logiciel AutoCAD et d'un ruban de mesure visible utilisé comme référence. La photographie entière et l'échelle métrique sont présentées à la figure 3.



**Figure 3.** Talus de déblai présentant une érosion en rigoles et un mètre de ruban de mesure pour marquer l'échelle.

Une fois la photographie ci-dessus mise à l'échelle, une grille a été superposée sur l'image (figure 4). Les carrés incomplets de quadrillage ont alors été rognés avant que l'on ne compte, en dernier lieu, le nombre de segments de rigoles d'un mètre de long présents sur la photographie. Les  $0,090 \text{ m}^3$  de perte de sol par mètre de rigole, mesurés pour la plus grande rigole, ont alors été appliqués à tous les autres segments d'un mètre de rigoles identifiés sur la figure 4. Comme le montre la figure 4, la plupart des segments de rigole sont moins profonds et plus étroits que le segment mesuré (portant le chiffre 1 sur la figure 4). Par conséquent, l'application du volume mesuré de la perte de sol à tous les autres segments est conservatrice dans le sens où elle surestime la quantité réelle de sol érodé par les rigoles plus petites et plus étroites.

Au total, 26 segments d'un mètre de long ont été pris en compte ; l'on a alors obtenu une perte totale de  $2,34 \text{ m}^3$  de sol. Lorsqu'on divise ce volume par la surface de  $20 \text{ m}^2$  du talus de remblai présenté à la figure 4, l'abaissement moyen de la surface du sol pour les rigoles sur les talus est égal à  $0,12 \text{ m}$ . Comme auparavant, si l'on admet que ce talus a été créé pendant la construction de la route en 2011, le taux annuel d'abaissement de la surface du sol causé par l'érosion en rigoles depuis lors est égal à  $0,06 \text{ m/an}$ .



**Figure 4.** Segments de rigole d'un mètre et grille utilisés pour l'analyse spatiale.

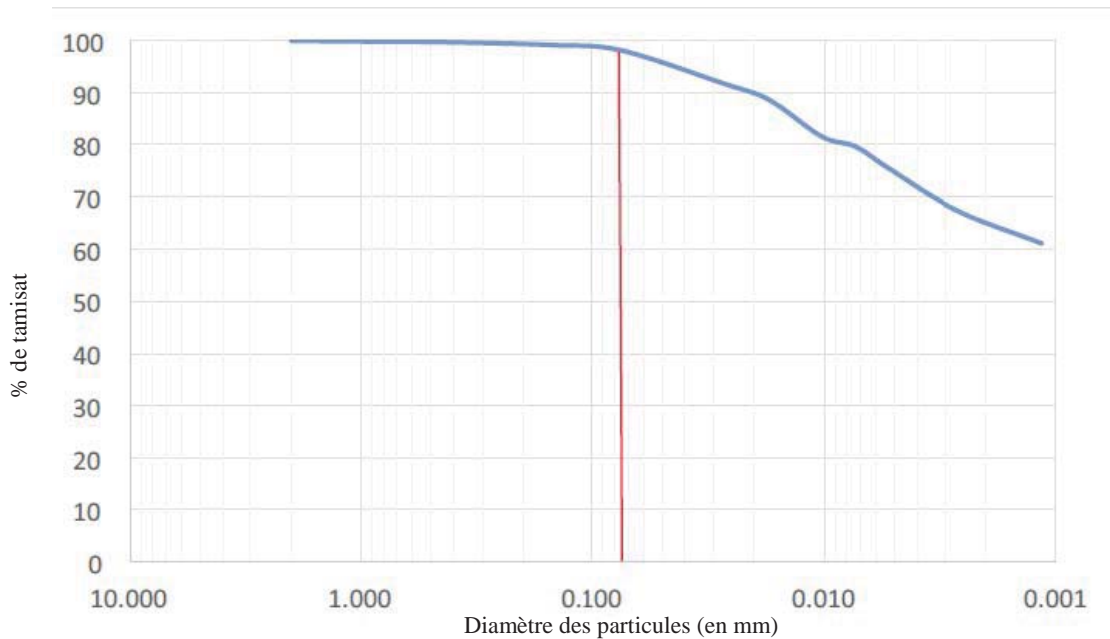
### **Répartition et classification des tailles de sédiments**

Des échantillons de sédiments ont été recueillis sur quatre sites : dans trois pièges à sédiments et sur un talus de déblai. L'échantillon du talus de déblai a été prélevé dans les matériaux meubles au pied du glissement de terrain rotationnel trouvé sur le site n° 2 (voir le tableau 3) ; il est considéré comme étant représentatif du sol de l'ensemble du talus. Une inspection visuelle a permis d'identifier un horizon A peu profond (15 à 30 cm de profondeur) et un horizon B très profond et uniforme dans la masse de sol. L'échantillon a été prélevé dans cet horizon B. Les pièges à sédiments sont situés aux extrémités des caniveaux qui drainent les surfaces de la route (matériau grossier) et les déblais dans les terres.

Les quatre échantillons ont été exploités à l'aide de la méthode d'essai normalisée ASTM International (anciennement appelée American Society for Testing and Materials) pour l'analyse granulométrique des sols : D422 – 63 (2007), ainsi qu'à l'aide de méthodes d'essai normalisées pour la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité des sols : D4318 — 10 (2010). La première méthode d'essai normalisée implique l'utilisation de tamis et de densimètres pour déterminer la répartition des tailles de particules dans un échantillon de sol, tandis que la seconde utilise deux essais distincts pour la limite de plasticité et la limite de liquidité. Les résultats de la répartition des tailles des sédiments et de leurs limites sont ensuite utilisés pour classer les échantillons de sol en fonction du système de classification unifié des sols (classification U.S.C.S.).



## Talus de déblai

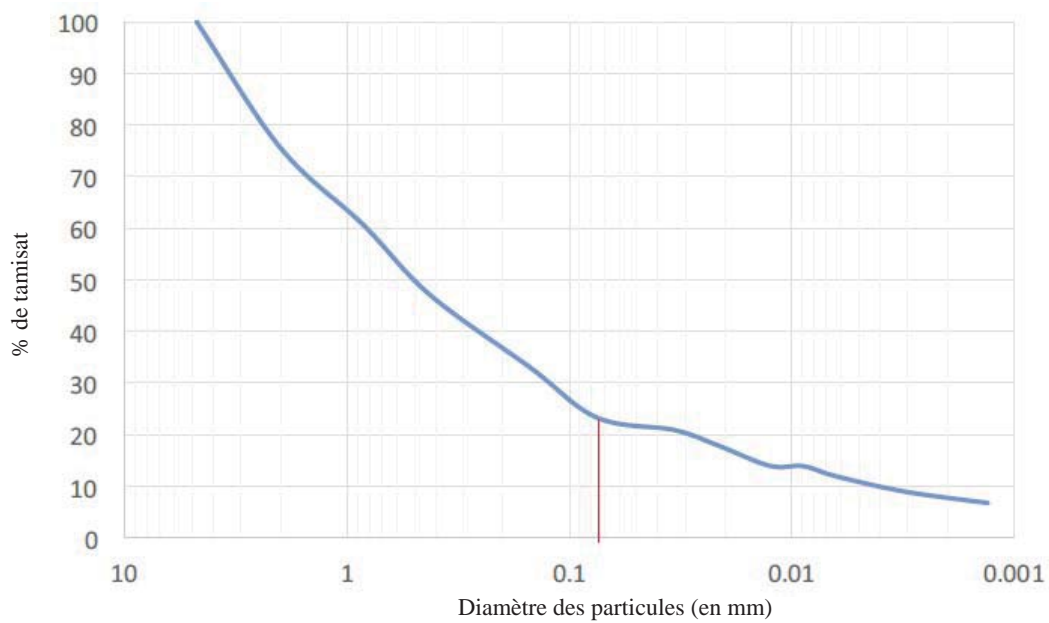


**Figure 5.** Répartition des tailles de particules pour le talus de déblai échantillonné.  
(Remarque : La ligne rouge indique que moins de 97 % des sédiments sont plus fins que 0,075 mm.)

Comme le montrent clairement les résultats de la figure 5 (ci-dessus), les matériaux qui composent le talus de déblai sont manifestement fins (les sédiments fins sont définis comme les particules retenues par le tamis n° 200, car leur diamètre dépasse 0,075 mm), avec très peu (moins de 3 %) de sol composé de particules dont le diamètre dépasse 0,075 mm. Cela montre que le comportement du sol est susceptible d'être dominé par la cohésion entre les particules principalement fines qui le composent. La nature cohésive du sol permet d'expliquer pourquoi la plupart des talus de déblai sont restés stables malgré leurs fortes pentes (1 :1).

## Piège à sédiments n° 2

Comme présenté à la figure 6, cet échantillon contient la plus grande quantité de matériau grossier (défini comme les particules retenues par le tamis n° 200 ou dont le diamètre est supérieur à 0,075 mm) de tous les échantillons. Environ 23 % de l'échantillon sont passés au travers du tamis n° 200 et ont donc été classés comme particules fines. Au cours de l'inspection visuelle du piège (figure 7), un matériau grossier et gris, érodé, issu de la plateforme de la route (qui correspond à 40 % de la surface qui s'écoule dans le piège n° 2) était facilement visible parmi la matière fine et rougeâtre dérivée de l'érosion des talus de déblai (qui correspond à 60 % de la zone de drainage). Nous pensons que la plus grande quantité de matériau grossier contenue dans cet échantillon est due au fait que le piège reçoit une plus grande part d'écoulement et de matière érodée depuis la plateforme de la route par l'intermédiaire des caniveaux, comparativement aux autres échantillons ; elle n'est pas le résultat d'une quelconque différence dans le type de sol de la zone, comparée aux autres échantillons.

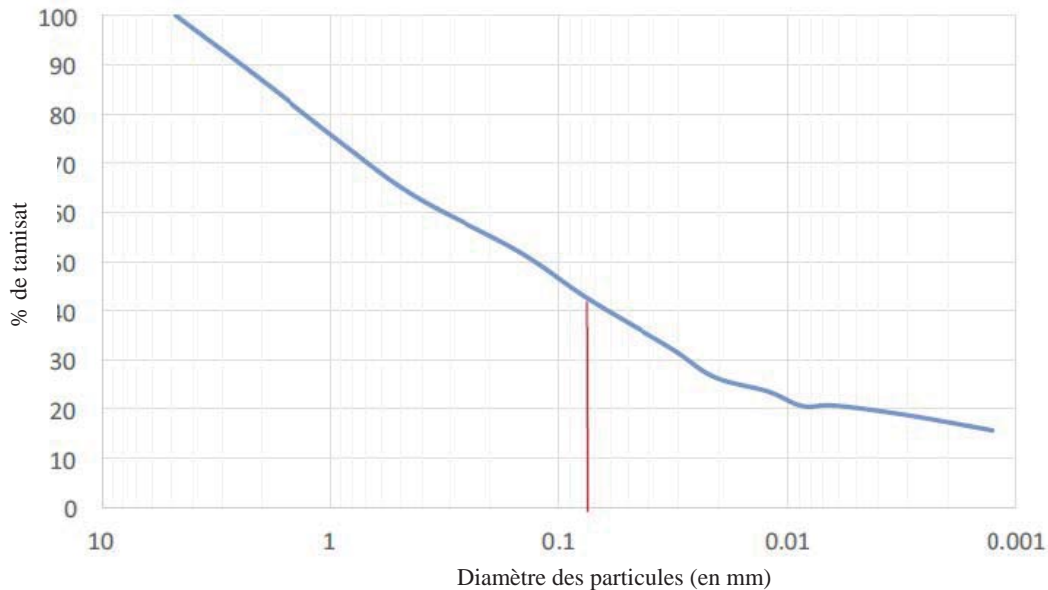


**Figure 6.** Répartition des tailles de particules pour le piège à sédiments n° 2. (Remarque : La ligne rouge indique que moins de 23 % des sédiments sont plus fins que 0,075 mm.)



**Figure 7.** Photographie *in situ* de sédiments retenus par le deuxième piège à sédiments.

### Piège à sédiments n° 3

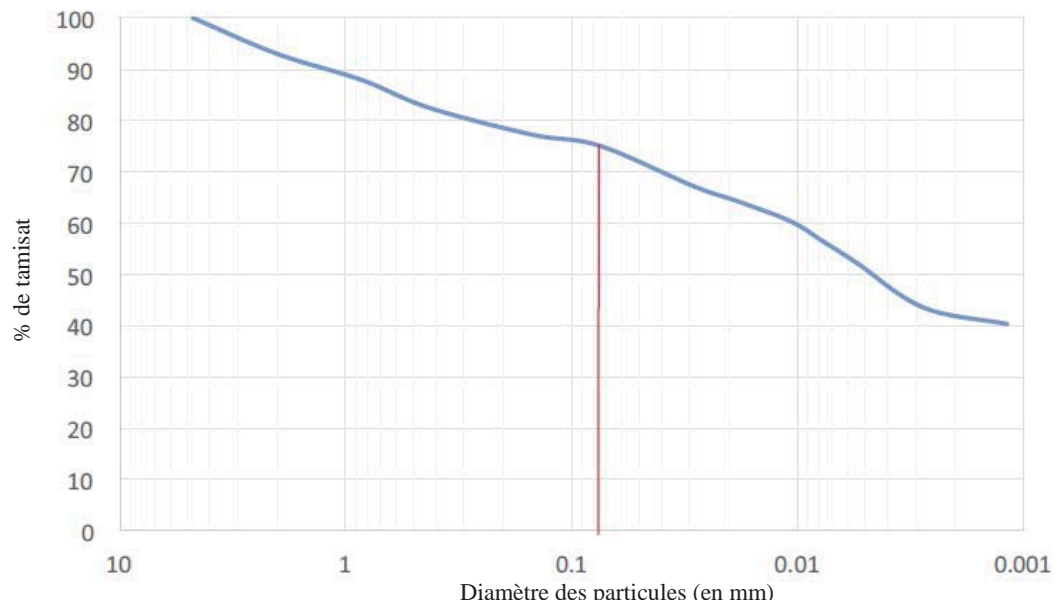


**Figure 8.** Répartition des tailles de particules pour le piège à sédiments n° 3. (Remarque : la ligne rouge indique qu'environ 43 % des sédiments sont plus fins que 0,075 mm.)

Les sédiments échantillonnés dans le piège n° 3 présentent le deuxième plus grand contenu de matériau grossier parmi les quatre échantillons, en ce sens qu'environ 43 % des particules du sol sont passés au travers du tamis n° 200 et sont donc classés comme fins. Il a été impossible d'examiner visuellement les sédiments retrouvés dans le piège lors de leur échantillonnage, car ils étaient submergés. La répartition des tailles de grains laisse à penser que ce piège reçoit du matériau grossier érodé issu de la plateforme de la route, ainsi que des matières fines érodées issues des talus de déblai. Toutefois, le pourcentage de matériau grossier est inférieur à celui retrouvé dans le piège n° 2.

### Piège à sédiments n° 4

La proportion de sédiments grossiers dans le piège n° 4 est inférieure à celle des pièges n° 2 et 3 ; les sédiments fins représentent environ 75 % de l'échantillon. Plus de la moitié du sol retrouvé dans ce piège est en fait très fine et la figure 10 indique que les sédiments piégés sont de la couleur brun rougeâtre commune à la plupart des sols présents dans la zone étudiée. La différence de composition des sédiments entre ce piège et les deux autres peut s'expliquer par la présence d'une zone tampon de sol nu de 8,7 m de large entre le caniveau en béton et la surface grossière de la plateforme de la route, qui contraste avec les pièges n° 2 et 3, dans lesquels s'écoule un peu de matière issue des caniveaux reliés à la plateforme de la route elle-même.



**Figure 9.** Répartition des tailles de particules pour le piège à sédiments n° 4. (Remarque : la ligne rouge indique qu'environ 75 % des sédiments sont plus fins que 0,075 mm.)



**Figure 10.** Sédiments collectés dans le piège n° 4. (Remarque : couleur brun rougeâtre commune à la plupart des sols dans la zone étudiée).



## Résumé de la taille des sédiments et des résultats relatifs aux limites

Le tableau 5 répertorie les résultats généraux pour chacun des quatre sites échantillonnés.

**Tableau 5.** Résumé des résultats et classification du sol pour chaque échantillon.

Attribut de l'échantillon	Talus de déblai	Piège n° 2	Piège n° 3	Piège n° 4	Moyenne
Grossier (en %)	1,9	76,7	57,6	24,9	40
Fin (en %)	98,1	23,3	42,4	75,1	60
Limite de liquidité	72	35	30	51	
Limite de plasticité	40	29	22	39	
Indice de plasticité	32	6	8	12	
Classification U.S.C.S.	MH- Limon élastique	SM- Sable silteux	SC- Sable argileux	ML- Limon élastique avec sable	

Comme indiqué ci-dessus, le tamis n° 200 a été sélectionné pour distinguer les sédiments fins des sédiments grossiers ; il correspond à un diamètre de particules de 0,075 mm. Les limites de plasticité et de liquidité sont présentées pour chaque sol. La différence entre ces deux limites est alors représentée par l'indice de plasticité. Pour terminer l'analyse, la répartition des tailles et les résultats de la plasticité ont été utilisés pour classer chaque échantillon en fonction des critères du Unified Soil Classification System (U.S.C.S.).

### **Contrastes entre les formes, les éléments déclencheurs et les processus de l'érosion par glissement de terrain et en ravins**

La présente section décrit et compare les glissements de terrain et les ravins comme caractéristiques d'érosion.

#### **Glissements de terrain**

Les glissements de terrain surveillés n'ont pas présenté d'évolution sensible pendant la période de surveillance, car les conditions permettant de déclencher une activité de glissements de terrain ne se sont pas produites pendant la période de l'étude.

Les glissements de terrain sont déclenchés par un ou plusieurs des éléments suivants :

- une météorisation en profondeur ;
- en l'absence de météorisation en profondeur, des structures sédimentaires ou planaires présentant une lithologie variable ;
- des argiles gonflantes ;
- de grandes quantités d'eau dans le sol et des pressions hydrostatiques positives ;
- des formations de glace pérennes, saisonnières ou diurnes ;
- des tremblements de terre ;
- le sapement basal causé par l'action des vagues ou par les rivières.



Les glissements de terrain observés entre la borne II et la rivière Infiernito sont uniquement apparus sur des talus taillés dans un sol présentant une météorisation en profondeur. Les conditions d'humidité au moment de ces glissements de terrain sont inconnues. Toutefois, étant donné le climat dans cette région, il semble probable que des niveaux élevés d'humidité et des pressions hydrostatiques positives aient déclenché ces événements. Aucun sapement des talus n'est apparu et la zone ne présente aucune trace d'argiles gonflantes. Par conséquent, il est peu probable que d'autres glissements de terrain se produisent, à moins qu'ils soient déclenchés par des chutes de pluie exceptionnellement importantes (contenu d'humidité très élevé et pressions hydrostatiques positives) ou par un tremblement de terre. L'un ou l'autre événement pourrait se produire, mais la fréquence de ces éléments déclencheurs inhabituels est faible.

## **Ravins**

Les ravins surveillés, tout comme les glissements de terrain, n'ont pas présenté de croissance importante pendant la période d'étude. Cela peut s'expliquer par le fait que le mur de tête du ravin restera immobile si le matériau qui compose le lit de la rupture de pente présente une résistance à la force tractrice supérieure à la tension d'entraînement aux limites fournie par le flux, et que le flux est insuffisant pour transporter le matériau érodé depuis la base du mur de tête. Cela semble être le cas dans les ravins surveillés. Les ravins ont été observés à certains endroits le long des talus de déblai et de remblai, mais l'on n'a pas remarqué de croissance sensible de l'érosion régressive.

Il est important de mentionner que l'érosion en ravins est définie comme étant le «processus d'érosion par lequel des eaux de ruissellement s'accumulent et reparaissent souvent dans des canaux étroits et, sur de courtes périodes, suppriment le sol de ces zones étroites jusqu'à des profondeurs considérables». (Poesen *et al.*, 2002) [traduction]. Pour les terres agricoles, les ravins sont souvent définis comme les canaux qui apparaissent dans les zones basses de la macrotopographie et qui sont trop profonds pour être améliorés par du matériel aratoire ordinaire, et dont la taille varie habituellement de 0,5 mètre à 25 ou 30 mètres (Soil Science Society of America, 2001) [traduction]. Dans les années 1980, l'expression «ravine éphémère» a été introduite pour décrire l'érosion par écoulement concentré, plus grande qu'une rigole, mais plus petite qu'un ravin classique. D'après la Soil Science Society of America (2001), les ravines éphémères sont «de petits canaux érodés par l'écoulement de surface concentré, facilement rebouchés par le travail du sol habituel, et qui se formeront de nouveau au même endroit en raison d'autres événements de ruissellement» (Sedimentation Engineering, American Society of Civil Engineers, 2008) [traduction].

## **Contrastes entre l'érosion par glissement de terrain et l'érosion en ravins**

Comme détaillés ci-dessus, les glissements de terrain sur les talus de la route 1856 sont déclenchés par un ensemble précis de conditions, la saturation du sol étant l'une des causes les plus probables. Une fois déclenchés, les glissements de terrain surviennent soudainement, après quoi d'autres glissements peuvent éventuellement se produire au même endroit. Les glissements de terrain observés sur la route 1856 ne présentent aucune preuve de croissance ultérieure après l'événement initial.

Contrairement aux glissements de terrain, les ravins sont déclenchés par un écoulement de surface concentré, qui supprime le sol de manière superficielle ; le retrait de matières pendant les chutes de pluie finit par créer un approfondissement et un élargissement du ravin. Les éléments susmentionnés laissent entendre que la formation d'un ravin est un processus graduel, et non un événement soudain comme le glissement de terrain.

En raison des différences entre les glissements de terrain et les ravins, inhérentes à leur origine et à leur développement, il n'est pas opportun de combiner les deux caractéristiques d'érosion lorsqu'on estime l'abaissement de la surface du sol. Par ailleurs, aucun talus situé dans la zone d'étude ne présente à la fois une érosion par glissement de terrain et une érosion en ravins.

Par conséquent, les emplacements où ces deux processus distincts surviennent sont différents et ne se sont, jusqu'à ce jour, pas chevauchés.

### Conclusions

D'après les mesures réalisées sur le terrain, les taux de perte de sol causée par l'érosion en nappe de la plateforme de la route et des talus de déblai varient entre 0,061 mètre et 0,095 mètre par année. La différence dans les estimations s'explique par les différences entre la quantité de sol perdu entre les prélèvements effectués pendant les périodes relativement sèches (juin et juillet) et les périodes relativement humides (juillet et août) en 2013. D'après ces mesures directes, il est conclu que le taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol causé par l'érosion en nappe le long de la route 1856 s'étend de ~0,06 à ~0,1 mètre par an.

Sur les talus de déblai surveillés, là même où des glissements de terrain ont été observés, les glissements occupaient 10 à 13 % de la surface totale du talus et y avaient fait baisser la surface du sol de 0,11 à 0,38 mètre. Il est raisonnable de supposer que les talus ont été créés lors de la construction de la route 1856 en 2011. Par conséquent, ils existent maintenant depuis au moins deux ans. Cela suppose des taux moyens d'abaissement de la surface du sol pour la surface totale des talus causé par les glissements de terrain compris entre 0,06 et 0,19 mètre par an.

Les ravins constatés sur les talus de déblai représentent le phénomène d'érosion le plus rare dans la section étudiée de la route 1856, tandis que les rigoles constituent le phénomène le plus courant. Le ravin surveillé sur le tronçon de route étudié présentait une profondeur maximale de trois mètres, mais recouvrait seulement un peu plus de 2 % du talus sur lequel il se situait et s'étendait sur une surface de 13,1 m<sup>2</sup>. Le volume total de sol érodé ayant créé le ravin est d'environ 6 m<sup>3</sup>. Lorsque ce volume est divisé par la surface totale du talus, l'abaissement moyen de la surface causé par l'érosion en ravins est égal à 0,01 mètre. Si nous supposons de nouveau que le talus a été créé lors de la construction de la route 1856 en 2011, le taux moyen d'abaissement de la surface du sol pour l'ensemble de la zone du talus causé par les ravins est d'environ 0,005 mètre par an.

La majorité des talus le long de la route 1856, située dans la zone d'étude, présente une érosion en rigoles. Sur le site d'étude des rigoles, la plus grande rigole présentait une largeur maximale de 0,3 mètre et une profondeur maximale de 0,6 mètre ; elle représente le pire exemple d'érosion en rigoles possible dans la zone d'étude. D'après l'analyse spatiale de toutes les rigoles dans la zone échantillonnée, et grâce à l'hypothèse conservatrice selon laquelle elles présentaient toutes des largeurs et des profondeurs égales à celles de la plus grande rigole, nous pouvons conclure que l'érosion en rigoles a, en moyenne, abaissé la surface du sol du talus de 0,12 mètre. Si l'on suppose de nouveau que le talus a été créé lors de la construction de la route 1856 en 2011, le taux moyen d'abaissement de la surface du sol pour l'ensemble de la zone du talus causé par les rigoles est d'environ 0,06 mètre par an. Cette estimation du taux d'abaissement de la surface du sol est considérée comme conservatrice pour les raisons susmentionnées.

Les talus de remblai situés dans la zone d'étude ne présentent pas d'érosion par glissement de terrain. Une érosion en rigoles est observée, même si elle touche de plus petites zones, avec moins d'intensité que dans les talus de déblai. Par conséquent, l'utilisation des profondeurs et des taux annuels calculés pour l'érosion en rigoles des talus de déblai est également recommandée pour les talus de remblai.

L'érosion en ravins sur les talus de remblai est importante et couvre environ 4 à 10 % des remblais mesurés ; les profondeurs moyennes de l'érosion qui en résultent sont comprises entre 0,10 m et 0,06 m. Contrairement à l'érosion des déblais de la route, celle-ci a eu lieu sur une durée plus courte de six mois. Par conséquent, le taux annuel moyen estimé d'abaissement de la surface du sol causé par l'érosion en ravins des talus de remblai est supérieur, et est compris entre 0,12 et 0,20 m/an.

Les résultats répertoriés dans le tableau 5 indiquent qu'en moyenne, 40 % des sédiments atteignant les pièges à sédiments sont grossiers (principalement du sable) et que les 60 % restants sont fins (limon et argile). Il est raisonnable de penser que le rapport de transfert des sédiments grossiers (sable) dans le fleuve San Juan est bien inférieur à celui du limon et de l'argile. En raison de sa taille et de sa masse, le matériau grossier se dépose plus près de son point d'origine que les sédiments fins et il est donc plus probable que le sable et les particules de graviers érodés provenant de la route 1856 restent sur le territoire costaricien et n'atteignent donc pas le fleuve San Juan. Par ailleurs, étant donné que le limon et l'argile sont en suspension et circulent à travers le fleuve San Juan, formé sur un lit de sable, tout le limon et l'argile qui devaient atteindre ce fleuve seront probablement transférés en aval par l'intermédiaire du système fluvial jusqu'au delta, où au moins 90 % retourneront en territoire costaricien via le Rio Colorado.

Etant donné que l'érosion par glissement de terrain et l'érosion en ravins sont deux types de phénomène géomorphologique, contrôlés par différents principes géophysiques, il est incorrect de les combiner ou de traiter l'érosion par glissement de terrain et l'érosion en ravins comme une entité géomorphologique unique.

Le tableau 6 contient un résumé de toutes les profondeurs moyennes d'érosion observées et les taux annuels moyens d'abaissement de la surface du sol, mentionnés dans le texte qui précède. Etant donné que ce résumé répertorie les valeurs les plus élevées de la surface érodée/surface de la caractéristique, de la profondeur moyenne d'érosion et du taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol pour chaque type d'érosion, toutes les estimations sont conservatrices.

**Tableau 6.** Résumé des résultats.

Type de caractéristique	Type d'érosion	Surface érodée/surface de la caractéristique (en %)	Profondeur moyenne d'érosion (en m)	Taux moyen d'abaissement de la surface du sol (en m/an)
Talus de déblai	Glissement de terrain	13	0,38	0,19
Talus de déblai	Ravin	2	0,01	0,005
Talus de déblai*	Rigole	50	0,12	0,06
Plateforme de la route et talus de déblai	Nappe	s.o.	0,02	0,095
Talus de remblai	Ravin	9	0,10	0,20

\*pourrait également être appliqué de façon conservatrice aux talus de remblai.

Tandis que l'hypothèse d'érosion, selon les caractéristiques étudiées, apparue au cours des deux dernières années est valable et que, par conséquent, les taux moyens d'abaissement de la surface, calculés pour les glissements de terrain, les ravins et les rigoles sur les talus de déblai sont également recevables, l'utilisation de la profondeur moyenne d'érosion pour ces caractéristiques est recommandée. En effet, ces valeurs sont les plus conservatrices et pourront être utilisées dans les calculs futurs de l'incidence de la production de sédiments issue de la route 1856 sur le fleuve nicaraguayen San Juan. En raison de la procédure différente utilisée pour surveiller l'érosion en nappe, il est recommandé d'utiliser un taux moyen d'abaissement de la surface égal à 0,095 m/an pour l'érosion en nappe. Pour finir, le taux moyen d'abaissement de la surface égal à 0,20 m/an représente la valeur la plus conservatrice pouvant être utilisée pour estimer l'érosion en ravins sur les remblais de la route ; son utilisation est recommandée pour toute étude future.

## Bibliographie

ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice N°110 2007. *Sedimentation Engineering, Processes, Measurements, Modeling and Practice*. Publié sous la direction de Marcelo H. García, ASCE, New York (Etats-Unis).

ASTM International, 2007. *ASTM D422 - 63(2007) Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvanie (Etats-Unis).

ASTM International, 2010. *D4318 - 10 Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvanie (Etats-Unis).

Dunne T. et Leopold, L.B., 1978. *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman and Company, New York (Etats-Unis).

Knighton, D., 1998. *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*. Hodder Arnold (Royaume-Uni).

Leopold L.B., Wolman M.G. et Miller J.P., 1995. *Fluvial Processes in Geomorphology*. Réimprimé par Dover Publications, Inc. New York (Etats-Unis).

Ministerio de Medio Ambiente, 1998. *Restauración Hidrológico Forestal de Cuencas Hidrográficas*. Edité par Filiberto López Cadenas de Llano.

Poesen, J. *et al.*, 2002. Gully Erosion in Dry Land Environments. Dry land Rivers, *in Hydrology and Geomorphology of Semi-arid Channels*. Publié sous la direction de Bull, L. J. et Kirkby, M. J., Wiley, New York.

Soil Science Society of America, 2001. *Glossary of Science Terms*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin (Etats-Unis).

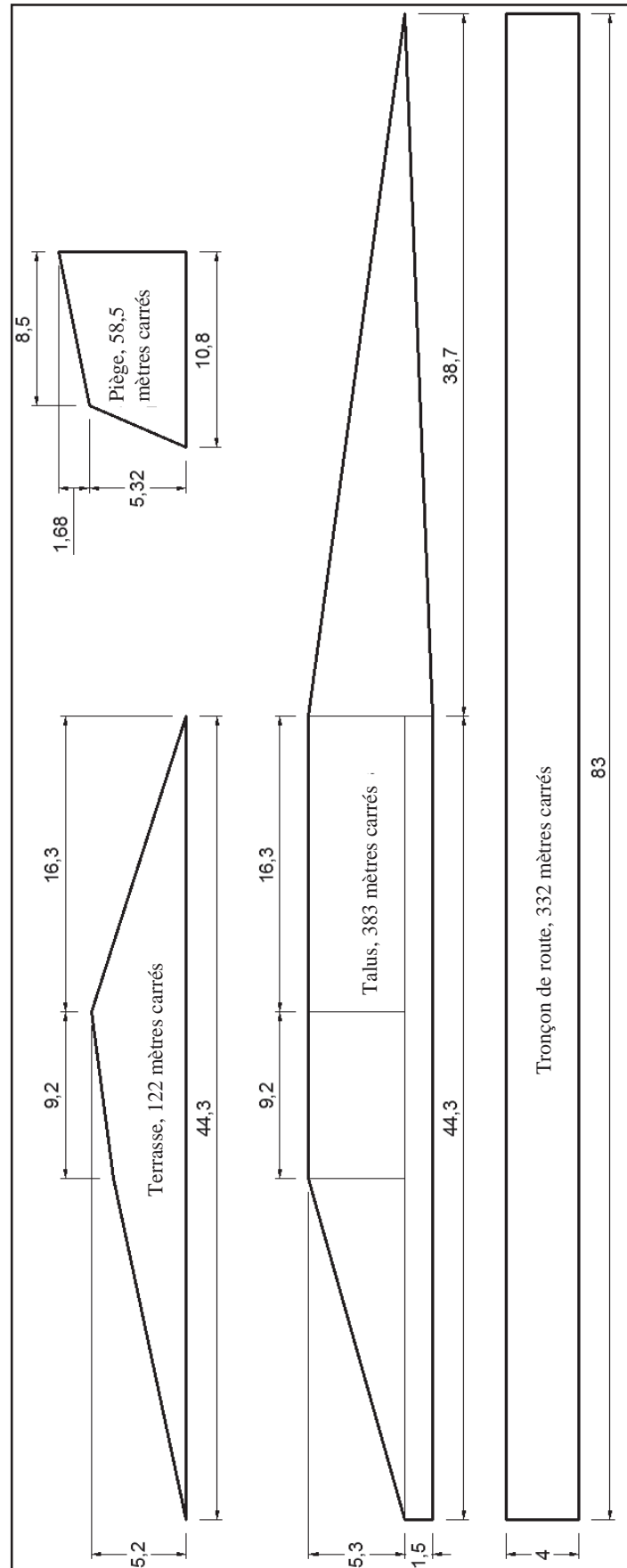


### Annexe I – Configuration du piège à sédiments n° 2

Les sédiments atteignent le piège n° 2 par l'intermédiaire d'une tranchée en béton de près de 90 m de long. Trois types distincts de terre se sont écoulés et déposés dans cette tranchée ; le premier était constitué de la surface d'un tronçon de route de 332 m<sup>2</sup> formée de la moitié de la largeur de la route le long de 83 m de caniveau. La seconde surface était constituée de deux talus dénudés, séparés sur 44,3 m par une terrasse formant la troisième surface. La tranche de cette terrasse est présentée sur la figure 11, alors que la ligne qui divise le talus est environ 1,5 m au-dessus de l'arête du caniveau en béton. La figure 12 présente séparément chaque zone et ses dimensions (en mètres).



**Figure 11.** Portion de la zone s'écoulant dans le piège à sédiments n° 2.



**Figure 12.** Diagramme du piège à sédiments n° 2, son talus drainé et les surfaces de la route.  
(Remarque : Le diagramme correspondant au talus est une vue de profil ; tous les autres diagrammes représentent des vues en plan.)

**ANNEXE 2**

**Commission pour le développement forestier (CODEFORSA) de San Carlos, services de conseil pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras, «Rapport d'activités destiné au ministère des affaires étrangères de la République du Costa Rica» (extrait), janvier 2013**

COMISIÓN DE DESARROLLO FORESTAL DE SAN CARLOS

Numéro d'enregistrement de l'entreprise : 3-002-066610-06

Téléphone : 2460-1055 Fax : 2460-1650

Adresse électronique : codeforsa@codeforsa.org

Site internet : www.codeforsa.org

BP 205-4400 Ciudad Quesada, San Carlos

**Services de conseil pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras  
SINAC-CDE-004-2012**

**Rapport d'activité destiné au ministère des affaires étrangères de la République du Costa Rica, Janvier 2013**

[Pages omises]

**Services de conseil pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras**

**Contrat de gré à gré en vertu de l'exception d'urgence SINAC-CDE-004-2012**

Date de début : avril 2012

Date de fin : avril 2014

Durée proposée pour le projet : 2 ans

## 1. Introduction

En vertu de l'adjudication SINAC-CDE-004-2012 du 12 avril 2012, déclaré définitif le 19 avril 2012, le contrat des **services de conseil pour l'élaboration et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras** a été officiellement octroyé à la Comisión de Desarrollo Forestal de San Carlos (CODEFORSA), Commission pour le développement forestier à San Carlos).

Conformément à la convention de services de conseil signée, un plan d'action a été soumis le 1<sup>er</sup> mai 2012 au bureau de la ministre déléguée chargée de l'environnement pour examen et approbation. Ledit plan d'action pour les services de conseil a été approuvé par le biais d'une communication officielle, réf. DVM-156-2012 ; la première phase du projet a ainsi été menée à bien.

Le présent document est un rapport d'avancement concernant les activités réalisées dans le cadre de la mise en œuvre du plan de gestion environnementale pour la route 1856, route frontalière.

Le présent document détaille les progrès réalisés en coordination avec les bureaux de SINAC, la signature des accords de participation avec les propriétaires terriens des zones environnant le fleuve San Juan, ainsi que la préparation du terrain et la plantation des arbres au cours de vingt événements qui ont impliqué la participation de bénévoles de différentes régions du pays.

L'une des tâches consistait à restaurer la végétation de douze pentes situées sur la partie bâtie de la route 1856.

[Pages omises]



**APPENDICE 3**

**PHOTOGRAPHIES DES TALUS AVANT ET APRÈS LA PLANTATION  
DE LA COUVERTURE VÉGÉTALE**

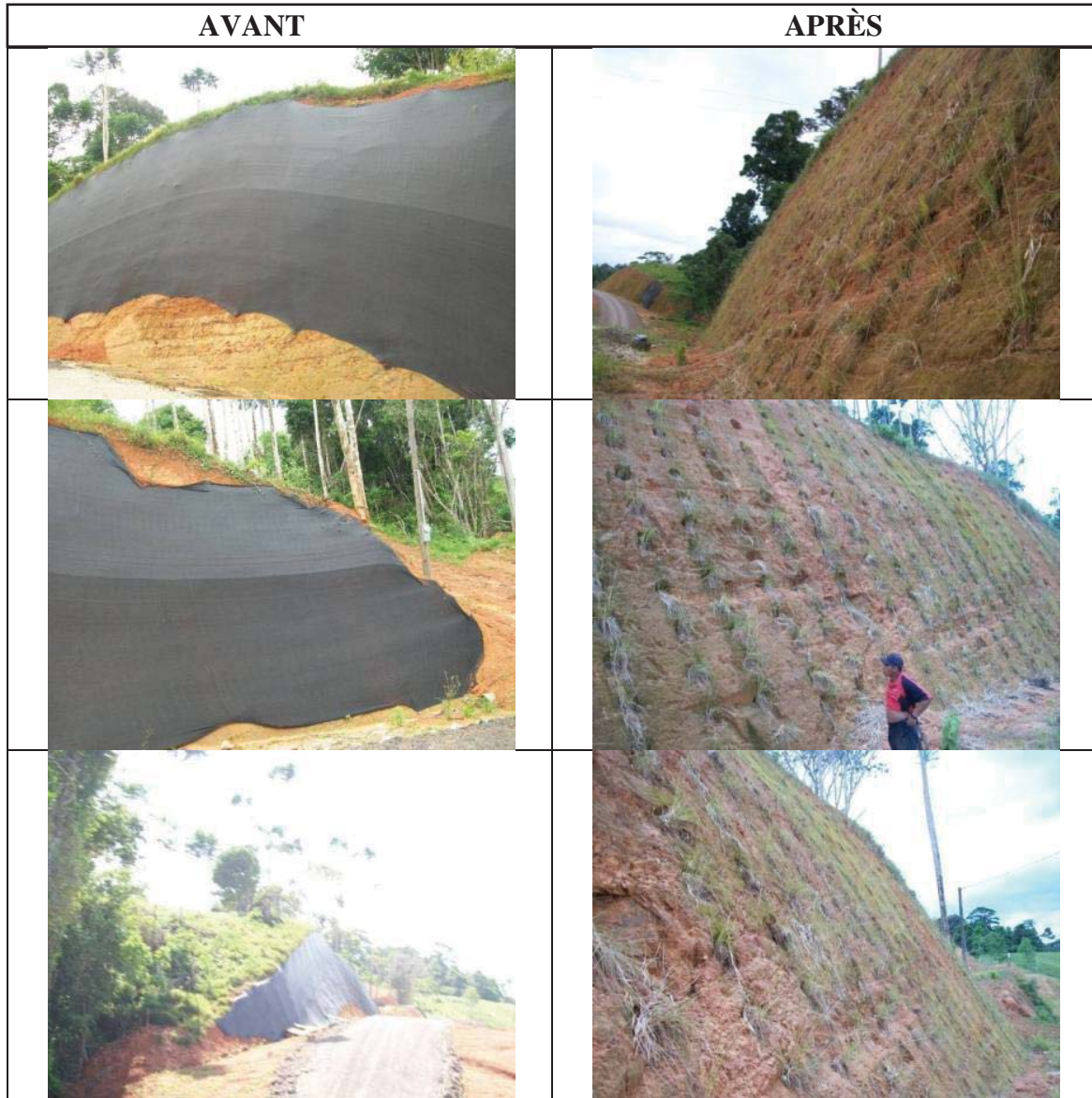
**TALUS N° 1**





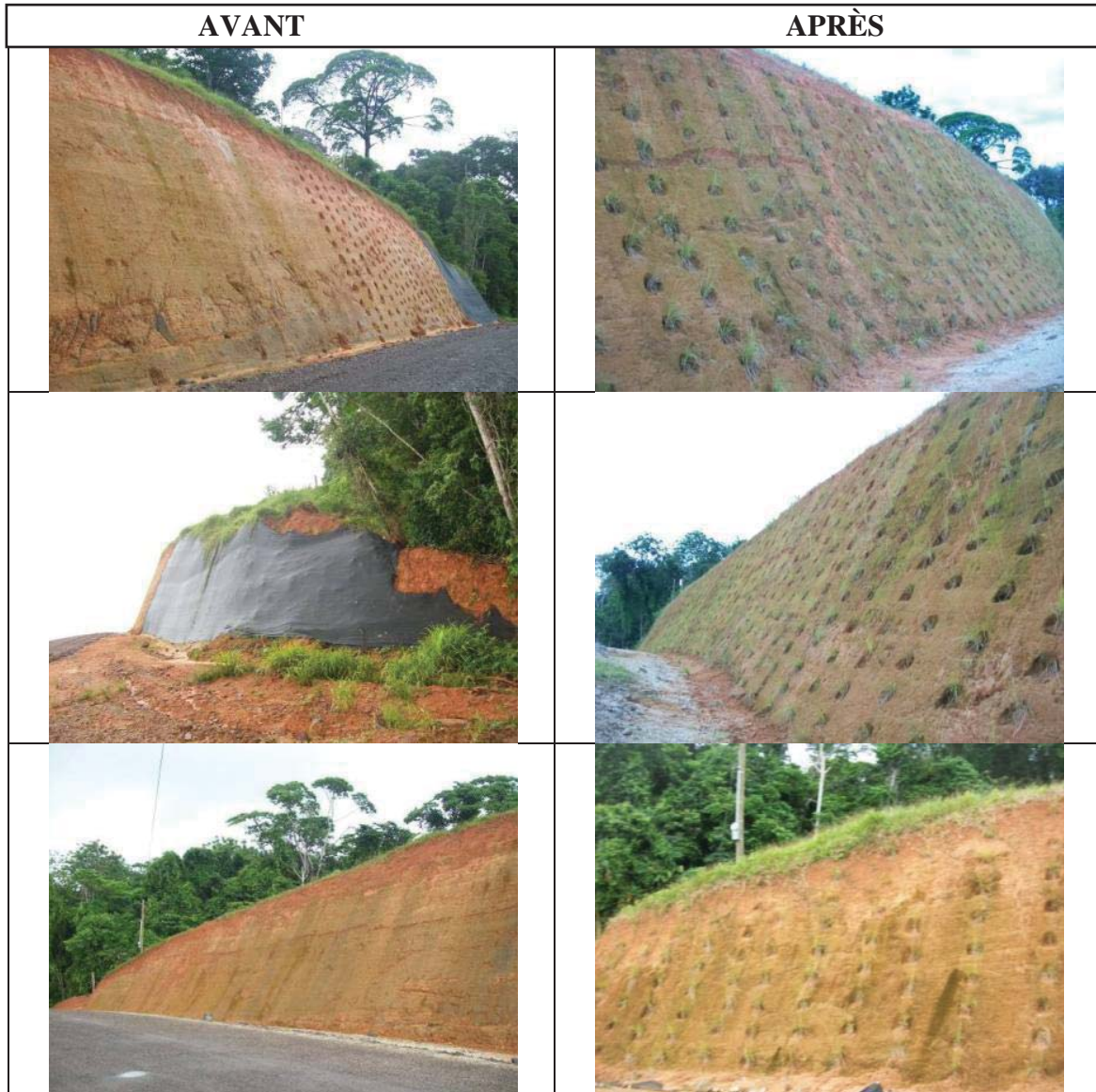


**TALUS N° 2**



Ce talus était recouvert d'une géomembrane, dérobée par des inconnus.

**TALUS N° 3**





---

**TALUS N° 4**



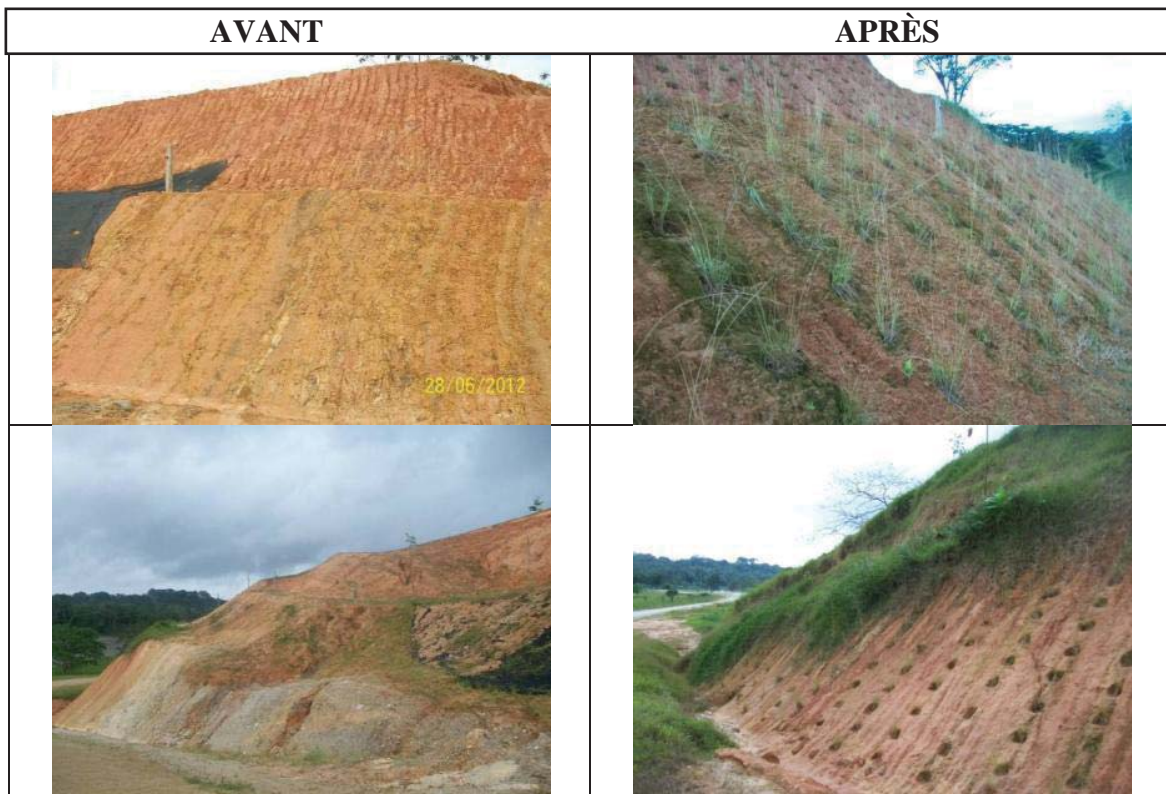
**TALUS N° 5**



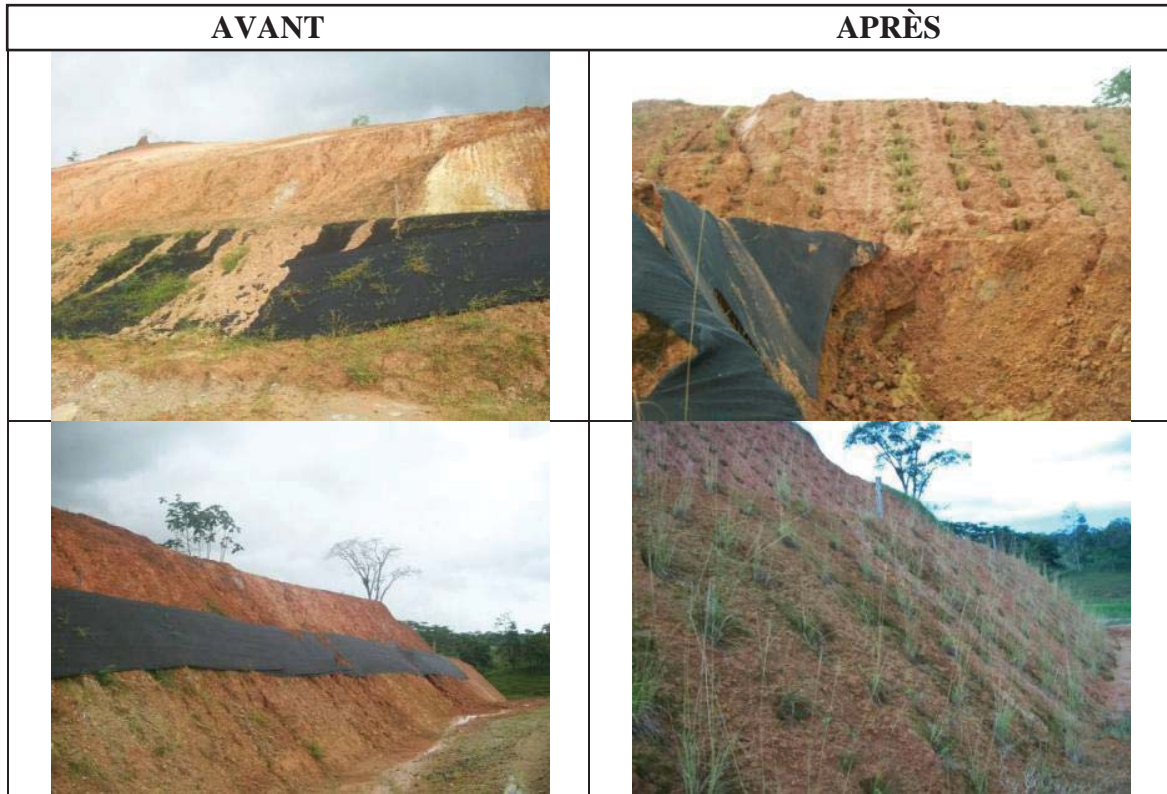




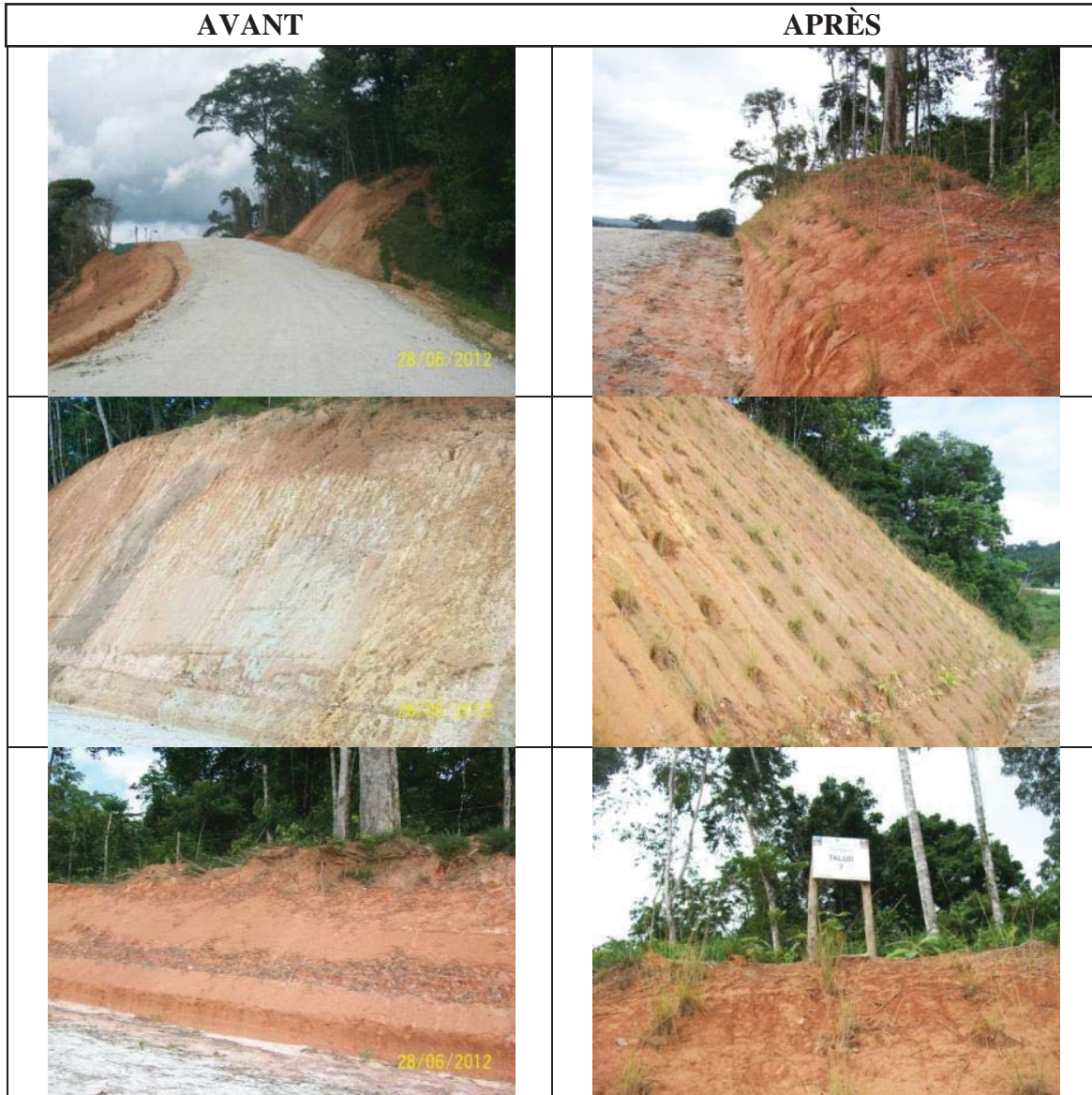
**TALUS N° 6**







**TALUS N° 7**





**ANNEXE 3**

**Allan Astorga G. et Andreas Mende, «Route 1856 : analyse de l'évolution de l'utilisation des terres d'après les images satellite prises avant et après la construction de la route frontalière», août 2013**



## TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos.....	35
1. Introduction.....	36
1.1. Présentation.....	36
1.2. Objectif.....	37
1.3. Méthodologie.....	37
1.4. Organisation du document.....	38
2. Résultats : effet net de l'évolution de l'aménagement du territoire.....	39
2.1. Types d'utilisation des sols.....	39
2.2. Cartes comparatives.....	41
2.3. Synthèse des résultats.....	54
3. Conclusions.....	56
4. Bibliographie.....	56

## AVANT-PROPOS

Cette étude a été rédigée par MM. Allan Astorga et Andreas Mende suite à une demande du ministère des affaires étrangères de la République du Costa Rica.

**M. Allan Astorga-Gättgens** est professeur de sédimentologie et de géologie environnementale à l'université du Costa Rica depuis 1991 et consultant en évaluation d'impact sur l'environnement, en gestion environnementale et en utilisation des sols. Il est titulaire d'une *Licentiate* en géologie de la faculté de géologie de l'université du Costa Rica (1987) et d'un doctorat de sciences naturelles de l'université de Stuttgart en Allemagne (1996).

**M. Andreas Mende** est consultant et expert en systèmes d'information géographique, télédétection, géologie environnementale, sédimentologie et hydrogéologie. Il a été chercheur à l'université du Costa Rica dans le cadre d'un post-doctorat de trois ans financé par la Fondation allemande de la recherche (DFG) et travaille depuis 2005 comme consultant indépendant à San José (Costa Rica). Il est titulaire d'un diplôme de géologie de l'université de Bonn (Allemagne) (1995) et d'un doctorat de sciences naturelles de l'université de Stuttgart en Allemagne (1999).



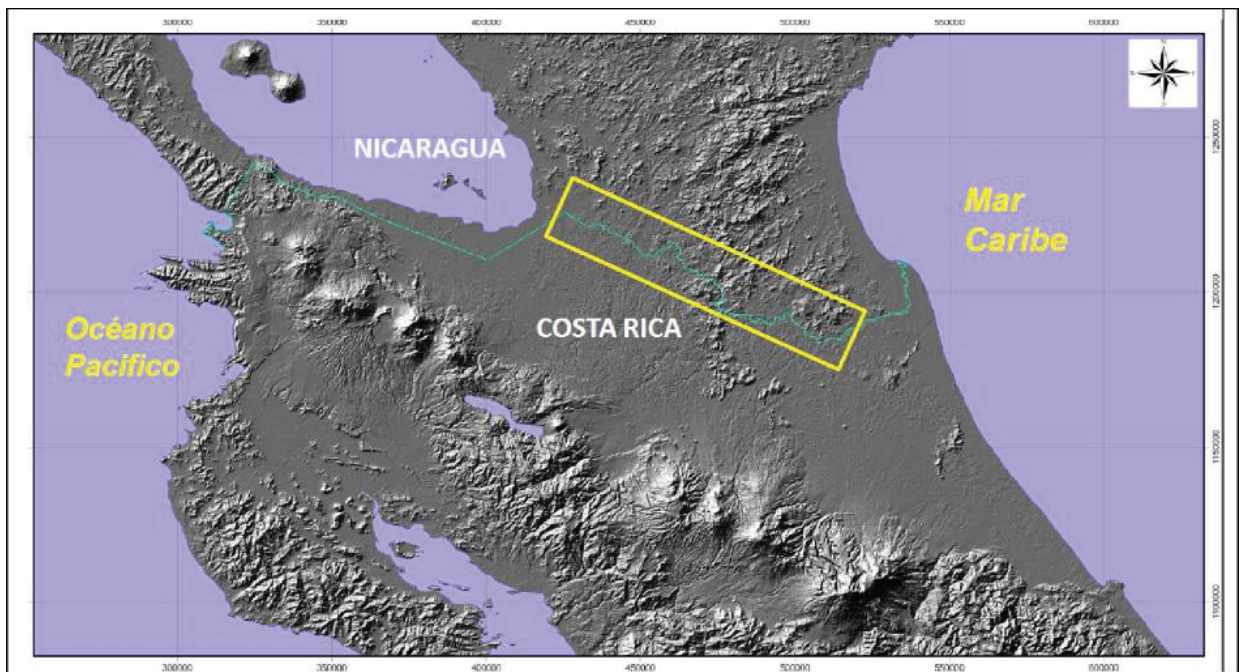
## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Présentation

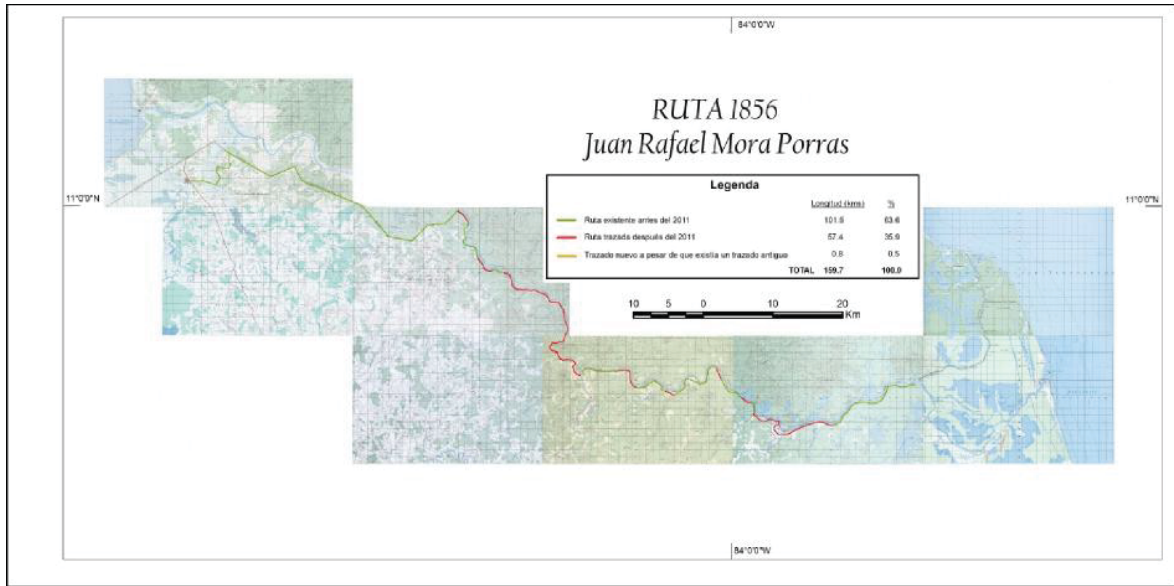
Compte tenu des circonstances qui ont entouré au départ la construction de la route 1856 et de la nécessité d'une évaluation des «effets de l'évolution de l'utilisation des sols» provoqués par cette opération, il est apparu nécessaire de procéder à une analyse de cette évolution. Cette analyse est retranscrite dans le présent document.

La **figure 1** présente l'emplacement géographique approximatif de la route 1856, construite comme route frontalière reliant la zone de Los Chiles au secteur du delta du fleuve Colorado (delta du FC) au nord du Costa Rica.

Il importe de préciser que cette analyse porte sur l'évolution de l'utilisation des sols dans le tronçon de la route 1856 qui est parallèle au fleuve San Juan, c'est-à-dire entre la borne II et le delta du FC. Cette analyse a pour but de constituer une évaluation quantitative des effets produits dans les différents écosystèmes présents dans la région (voir **figure 2**). La longueur totale de la route 1856 entre Los Chiles et le delta du FC est de 159,7 km, et de 108,2 km entre la borne II et le delta du FC. C'est ce dernier tronçon qui est l'objet de la présente étude.



**Fig. 1.** Carte de l'emplacement géographique approximatif de la route 1856



**Fig. 2.** Tronçon de la route 1856 objet de la présente analyse de l'évolution de l'utilisation des sols. Carte établie d'après les feuillets topographiques à l'échelle 1:50 000 de l'institut national de géographie du Costa Rica.

## 1.2. Objectif

L'objectif de la présente étude est de se livrer à une analyse comparative de l'utilisation des sols en suivant une méthode normalisée et en se fondant sur les renseignements fournis par des images satellite prises avant et après la construction de la route 1856 en 2011, à l'aide d'un système d'information géographique visant à établir l'effet net de l'évolution de l'utilisation des sols résultant de la construction de ladite route frontalière.

## 1.3. Méthodologie

Pour procéder à cette analyse, nous avons suivi les étapes méthodologiques suivantes :

- 1) Utilisation d'une méthodologie normalisée, précédemment établie au Costa Rica par la voie du décret exécutif n° 32967 — MINAE, afin d'établir l'utilisation des sols dans une zone d'étude préalablement choisie, à savoir une bande d'un kilomètre de large en territoire costa-ricien à partir de la rive droite du fleuve San Juan.
- 2) Elaboration d'un état des lieux topographique d'après les feuillets topographiques à l'échelle 1:50 000 de l'institut national de géographie du Costa Rica (Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica).
- 3) Interprétation de photographies aériennes et d'images satellite d'une résolution allant de 0,5 à 5 m/pixel, prises avant et après la construction de la route 1856 par une entreprise spécialisée et fournies par le Gouvernement du Costa Rica.
- 4) Vérification systématique sur le terrain, au moyen notamment de survols et de missions effectuées avec l'ingénieur forestier Rafael Bolaños du Centre scientifique tropical (Centro Científico Tropical).

- 5) Saisie de l'ensemble des renseignements ayant fait l'objet d'une interprétation dans un système d'information géographique.
- 6) Analyse comparative et génération de statistiques permettant d'établir une cartographie du secteur avant et après la construction de la route 1856.

La qualité des images satellite d'une résolution allant de 0,5 à 5 m/pixel, ainsi que des photographies aériennes ayant servi à l'interprétation de l'utilisation des sols présentée dans cette étude est suffisamment bonne pour que l'on puisse y distinguer plusieurs détails, en particulier les types de végétation présents dans la zone étudiée. En outre, l'interprétation tirée de ces images a été complétée par un examen systématique sur le terrain, grâce auquel les renseignements obtenus grâce aux images ont pu être vérifiés. Ces renseignements ont été traités par un système d'information géographique (SIG) qui a permis d'affiner la précision des données et en particulier les calculs relatifs aux zones présentées dans le **tableau 2**. Cette méthodologie permet d'établir les différents types d'utilisation des sols analysés dans le tableau 2 avec une précision de l'ordre de quelques mètres et une marge d'erreur inférieure à 1 %.

Il convient de souligner qu'avant la construction de la route 1856, il existait des routes préexistantes sur une partie importante de la distance concernée. Il existait déjà des routes rustiques sur une distance de 101,5 km (voir figure 2), soit 63,6 % de la longueur totale de la route reliant Los Chiles au delta du FC (159,7 km). De même, dans le secteur situé entre la borne II et le delta du FC, 50 km de la route 1856 (soit 46,2 %) ont été construits sur des routes rustiques préexistantes. Ces routes possédaient des caractéristiques différentes en matière de largeur et de servitudes et reliaient plusieurs villages. La route 1856 a été construite sur les fondements de ce dispositif routier. Ce facteur est pris en compte dans la présente analyse.

#### **1.4. Organisation du document**

A l'exception du chapitre introductif, ce rapport technique compte deux chapitres supplémentaires, à savoir :

- Principaux résultats
- Conclusions

## 2. RÉSULTATS : EFFET NET DE L'ÉVOLUTION DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

### 2.1. Types d'utilisation des sols

Les 15 types d'utilisation des sols identifiés grâce à l'interprétation des photographies et des images satellite répertoriées dans le présent rapport sont décrits au **tableau 1**.

Par ailleurs, la **figure 3** présente, à des fins d'illustration, un exemple d'interprétation de l'utilisation des sols sur un tronçon de la route 1856 parallèle à la rive droite du fleuve San Juan. Des exemples particuliers d'interprétation d'images satellite sont consultables en **appendice 1**.



**Fig. 3.** Photographie de la rive droite du fleuve San Juan avec exemple d'interprétation de l'utilisation des sols dont il est question dans le présent rapport.



**Tableau 1. Types d'utilisation des sols identifiés grâce à l'interprétation des images prises avant et après la construction de la route 1856.**

N°	Catégorie	Description
1.	<b>Zones urbanisées (Zonas urbanizadas)</b>	Zones peu ou pas arborées. Elles sont constituées de surfaces occupées par des constructions : maisons, bâtiments connexes, etc.
2.	<b>Cultures (Cultivos)</b>	Zones réservées à la production agricole, qui se distinguent par des structures et des formes facilement repérables sur les images et à l'aide d'une vérification sur le terrain.
3.	<b>Pâturages (Pastos)</b>	Zones très déstructurées dans lesquelles prédominent les graminées vivaces non épineuses d'une hauteur de moins d'un mètre. Ces terres ont une utilisation principalement sylvo-pastorale et peuvent varier dans leur composition.
4.	<b>Zones de pâturages et d'arbres (Pastos mezclados con árboles)</b>	Equivalente à la catégorie précédente, mais avec quelques arbres éparpillés dans les pâturages.
5.	<b>Forêt montagneuse primaire (Bosque primario de montaña)</b>	Forêt située dans des zones présentant des pentes modérées à élevées, peu ou pas perturbée par l'activité humaine, caractérisée par une flore présentant une structure et une composition optimales.
6.	<b>Forêt montagneuse secondaire (Bosque secundario de montaña)</b>	Forêt située dans des zones présentant des pentes modérées à élevées, qui était autrefois une forêt primaire, mais qui a été perturbée par l'activité humaine. Sa structure est similaire à celle des forêts primaires en matière de strates, mais peut présenter des différences par rapport à celles-ci en matière de diamètre de la canopée, de composition ou d'homogénéité.
7.	<b>Forêt primaire de plaine (Bosque primario de planicie)</b>	Forêt présentant des caractéristiques similaires à celles des forêts montagneuses primaires, mais située sur une plaine ou une surface légèrement vallonnée.
8.	<b>Forêt secondaire de plaine (Bosque secundario de planicie)</b>	Forêt présentant des caractéristiques similaires à celles des forêts montagneuses secondaires, mais située sur une plaine ou une surface légèrement vallonnée.
9.	<b>Plantations d'arbres (Plantaciones de árboles)</b>	Zones cultivées avec présence d'arbres dispersés.
10.	<b>Brousse, forêt dégradée (Charrales, bosque degenerado)</b>	Vestiges de forêts primaires ou secondaires qui ont subi des perturbations et une exploitation forestière et dans lesquels on observe une couverture végétale hétérogène (inférieure à 3 mètres).
11.	<b>Zones temporairement inondées (Zonas temporalmente inundadas)</b>	Zones de faible altitude situées à proximité de lits de cours d'eau ou de plans d'eau et qui risquent, en cas de fortes précipitations, d'être temporairement inondées.
12.	<b>Palmiers à raphia (Yolillales)</b>	Zones de faible altitude dont le sol est humide et couvert de palmiers à raphia, considérées comme zones humides.
13.	<b>Zones humides lacustres (Humedales lacustrinos)</b>	Zones de faible altitude dont le sol est saturé, avec présence d'eau et de végétation hydrophyte.
14.	<b>Plans d'eau (Cuerpos de agua)</b>	Voies d'eau permanentes ou intermittentes et plans d'eau accumulés.
15.	<b>Zones affectées par la construction de la route 1856 (Áreas afectadas por la Ruta 1856)</b>	Reliefs faisant l'objet de travaux de terrassement dans le cadre de la construction de la route 1856 : déblais et remblais, revêtement routier, accotements et fossés et zones louées temporairement afin de stocker les agrégats destinés à la construction de la route.

## 2.2. Cartes comparatives

Les figures 4 à 9 correspondent aux cartes comparatives d'interprétation de l'utilisation des sols pour la bande d'un kilomètre de large analysée dans la présente étude. La version *a*) des figures montre l'interprétation de l'utilisation des sols avant la construction de la route 1856, et la version *b*) l'interprétation après la construction de la route 1856.

Le tronçon allant de la borne II à Delta Costa Rica qui fait l'objet de cette analyse compte au total six segments, qui sont les suivants :

- Segment 1 (figures 4*a*) et 4*b*) : de la borne II à Crucitas ;
- Segment 2 (figures 5*a*) et 5*b*) : de Crucitas à l'embouchure du San Carlos ;
- Segment 3 (figures 6*a*) et 6*b*) : de l'embouchure du San Carlos à Remolino Grande ;
- Segment 4 (figures 7*a*) et 7*b*) : de Remolino Grande au nord-ouest de Trinidad ;
- Segment 5 (figures 8*a*) et 8*b*) : du nord-ouest de Trinidad à l'ouest de Tigra Segment 6 (figures 9 *a*) et 9 *b*) : de l'ouest de Tigra à Delta Costa Rica.

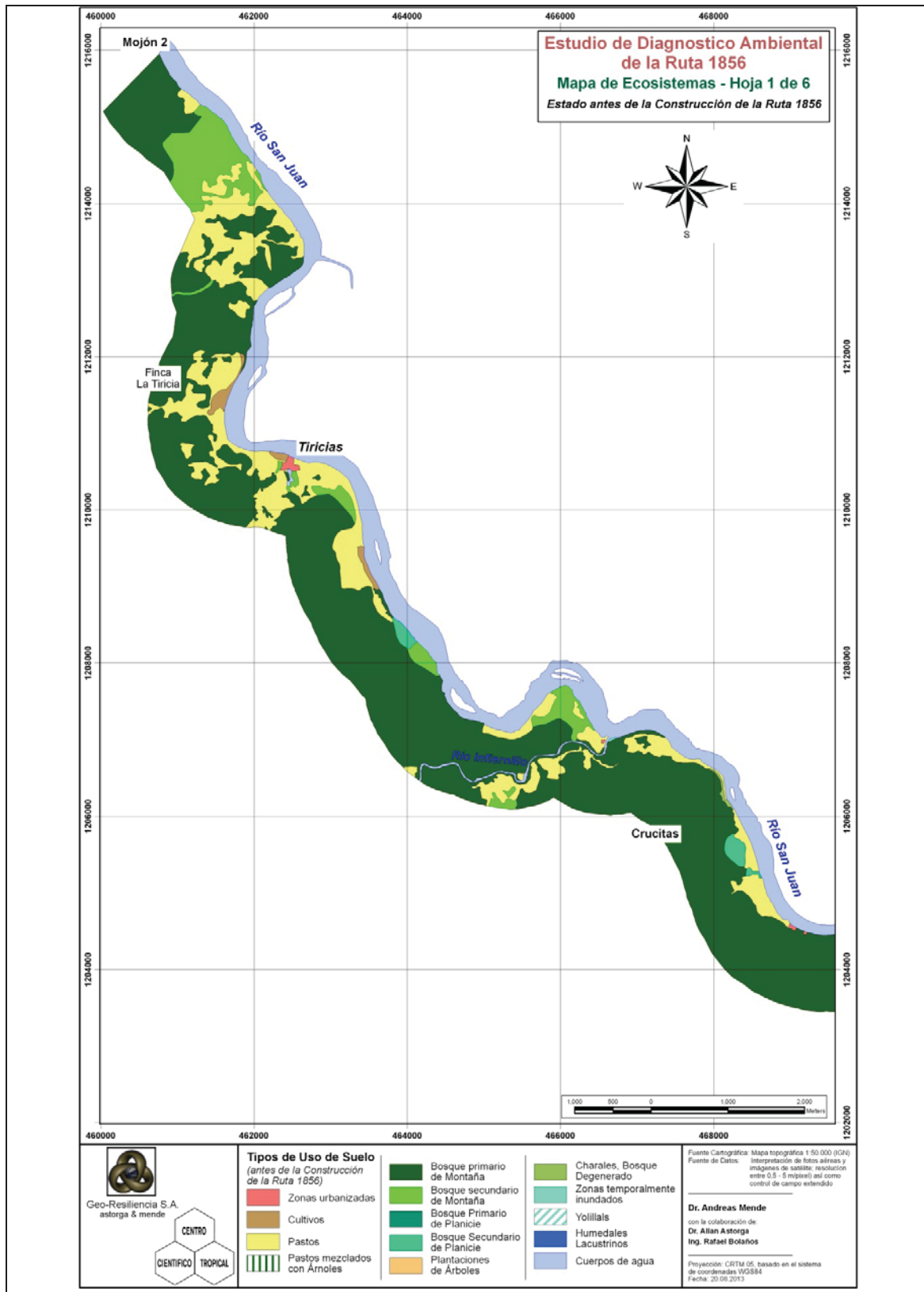


Fig. 4 a). Segment 1, de la borne II au secteur de Crucitas avant la construction de la route 1856.

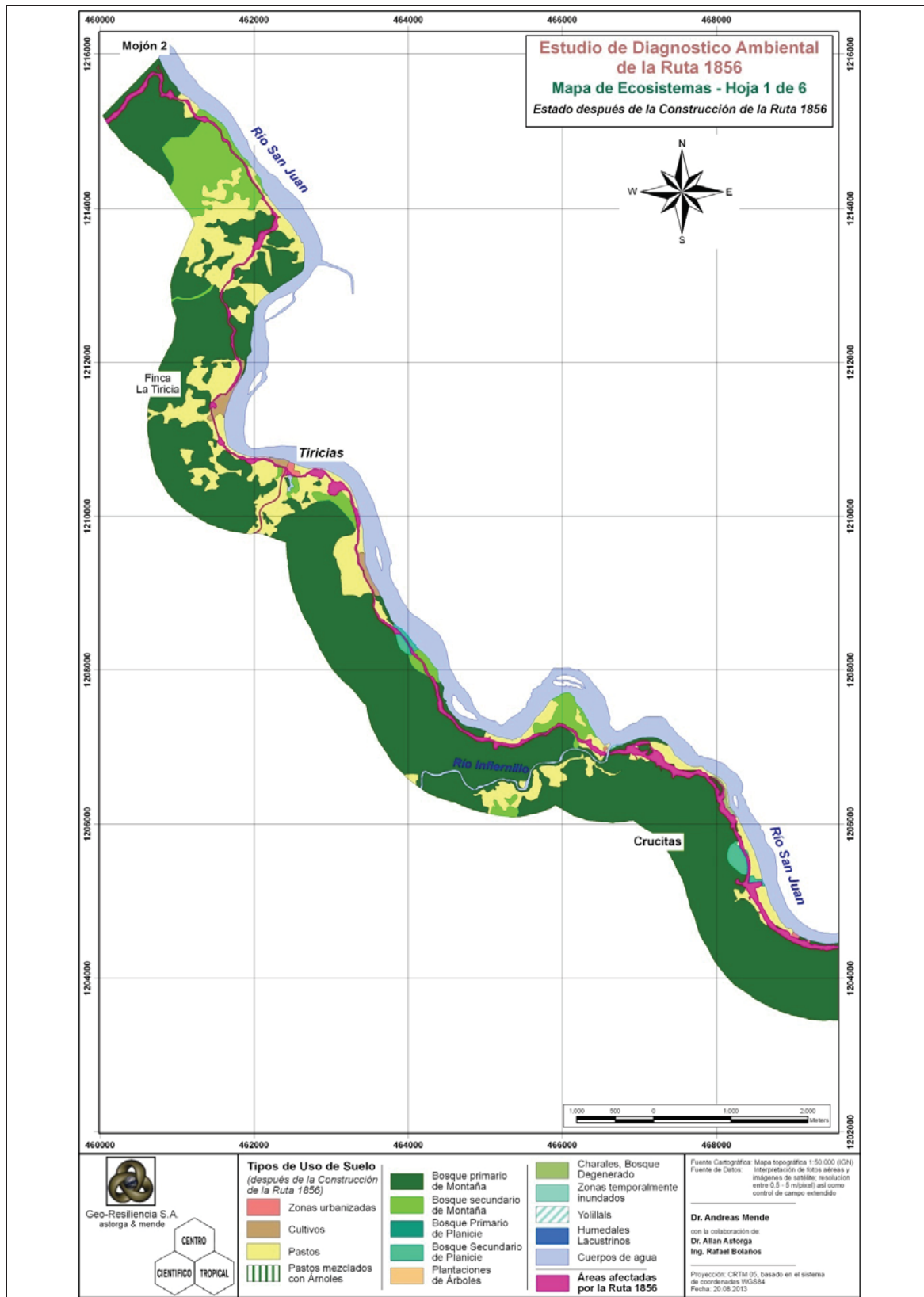


Fig. 4 b). Segment 1, de la borne II au secteur de Crucitas après la construction de la route 1856.



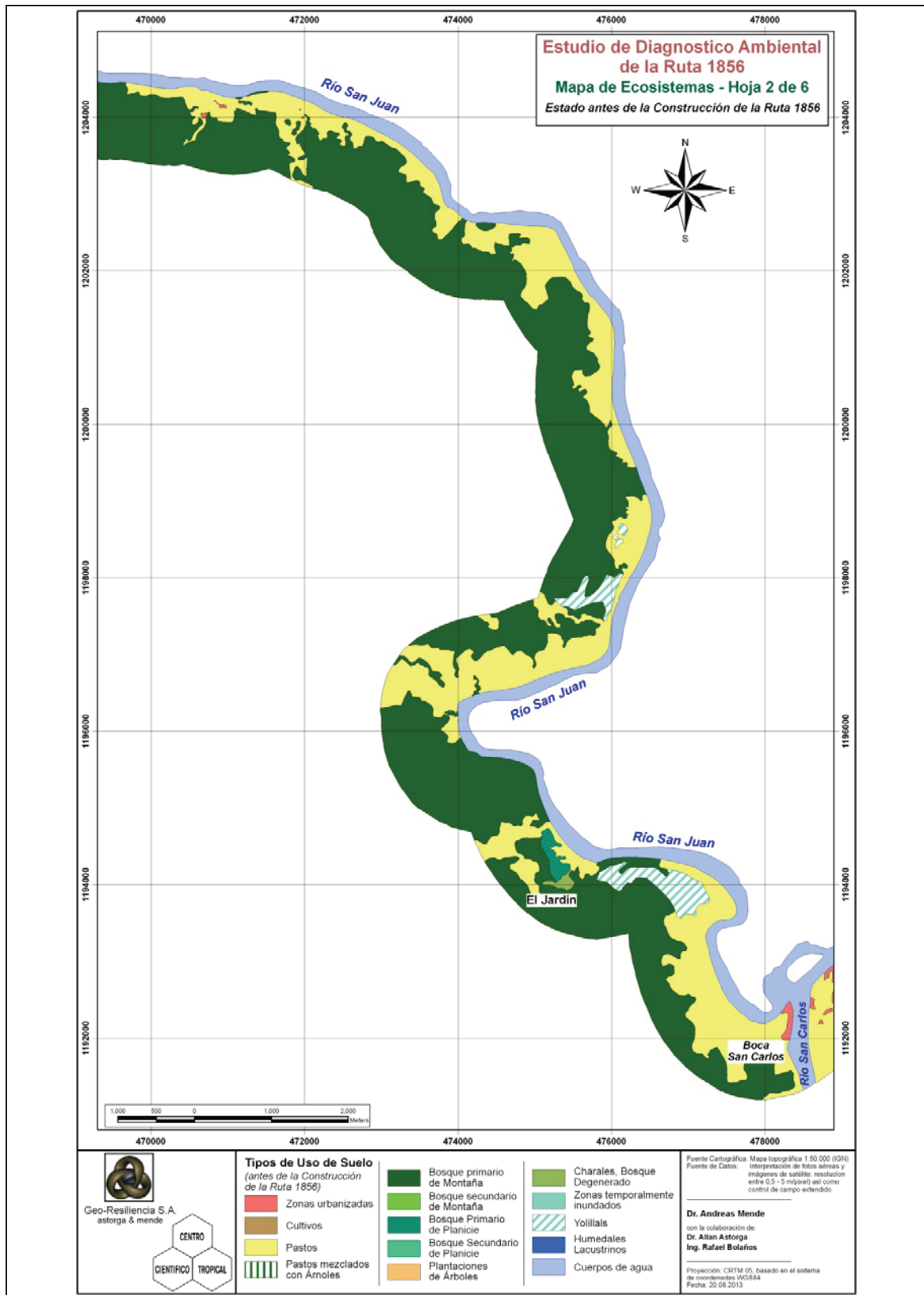


Fig. 5 a). Segment 2, de Crucitas à l'embouchure du San Carlos avant la construction de la route 1856.

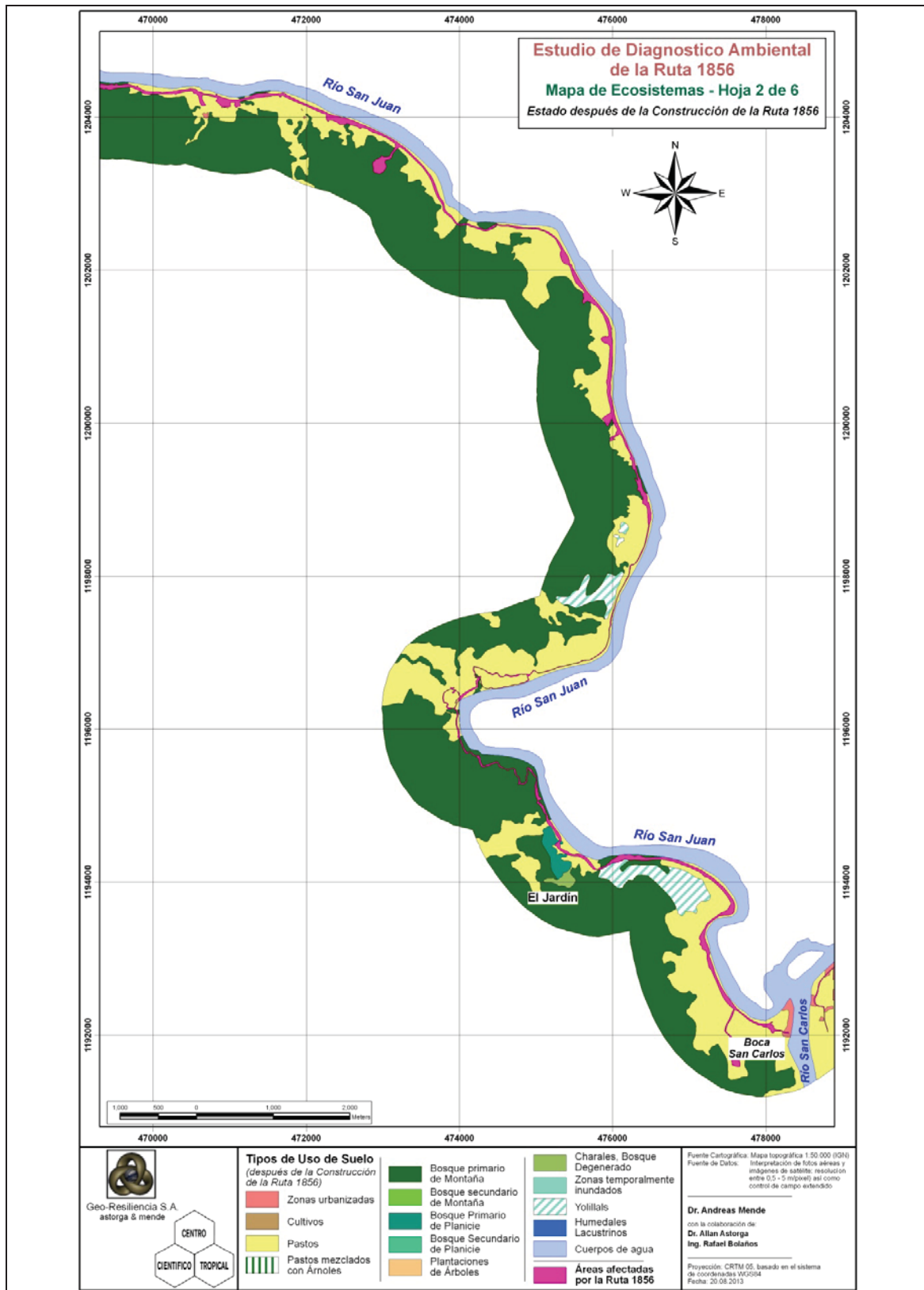


Fig. 5 b). Segment 2, de Crucitas à l'embouchure du San Carlos après la construction de la route 1856.

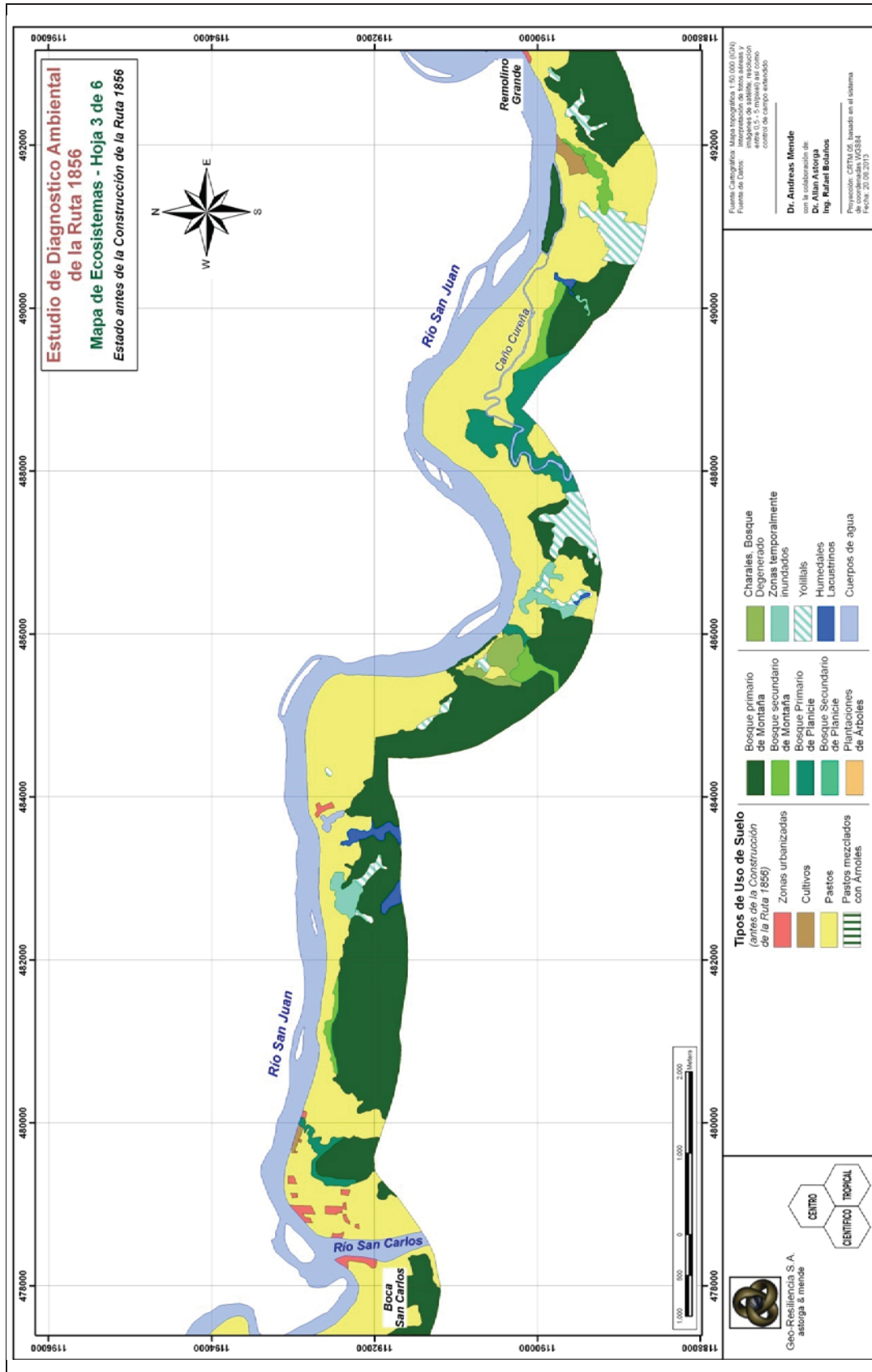


Fig. 6 a). Segment 3, de l'embouchure du fleuve San Carlos à Remolino Grande avant la construction de la route 1856.

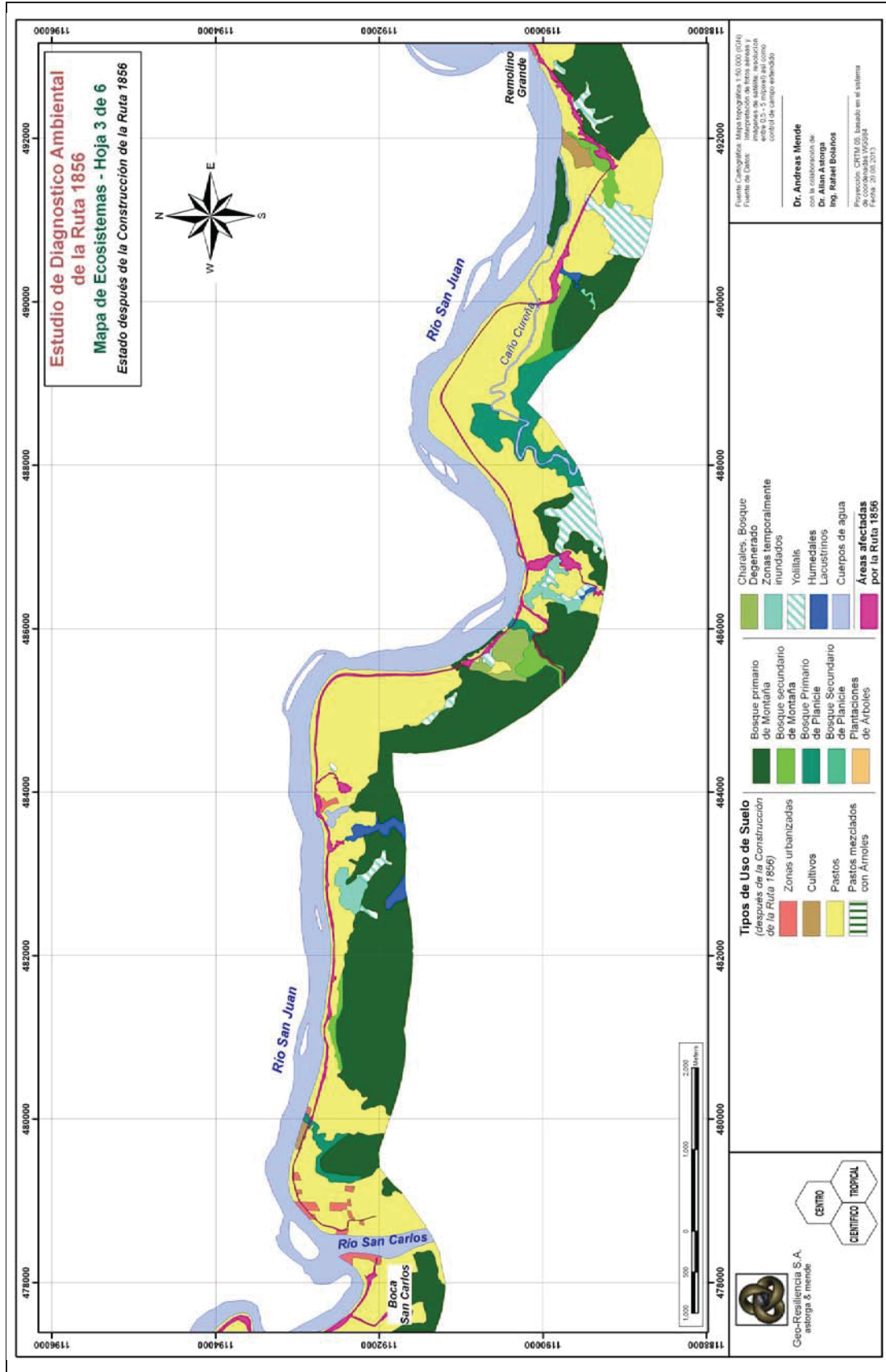


Fig. 6 b). Segment 3, de l'embouchure du fleuve San Carlos à Remolino Grande après la construction de la route 1856.



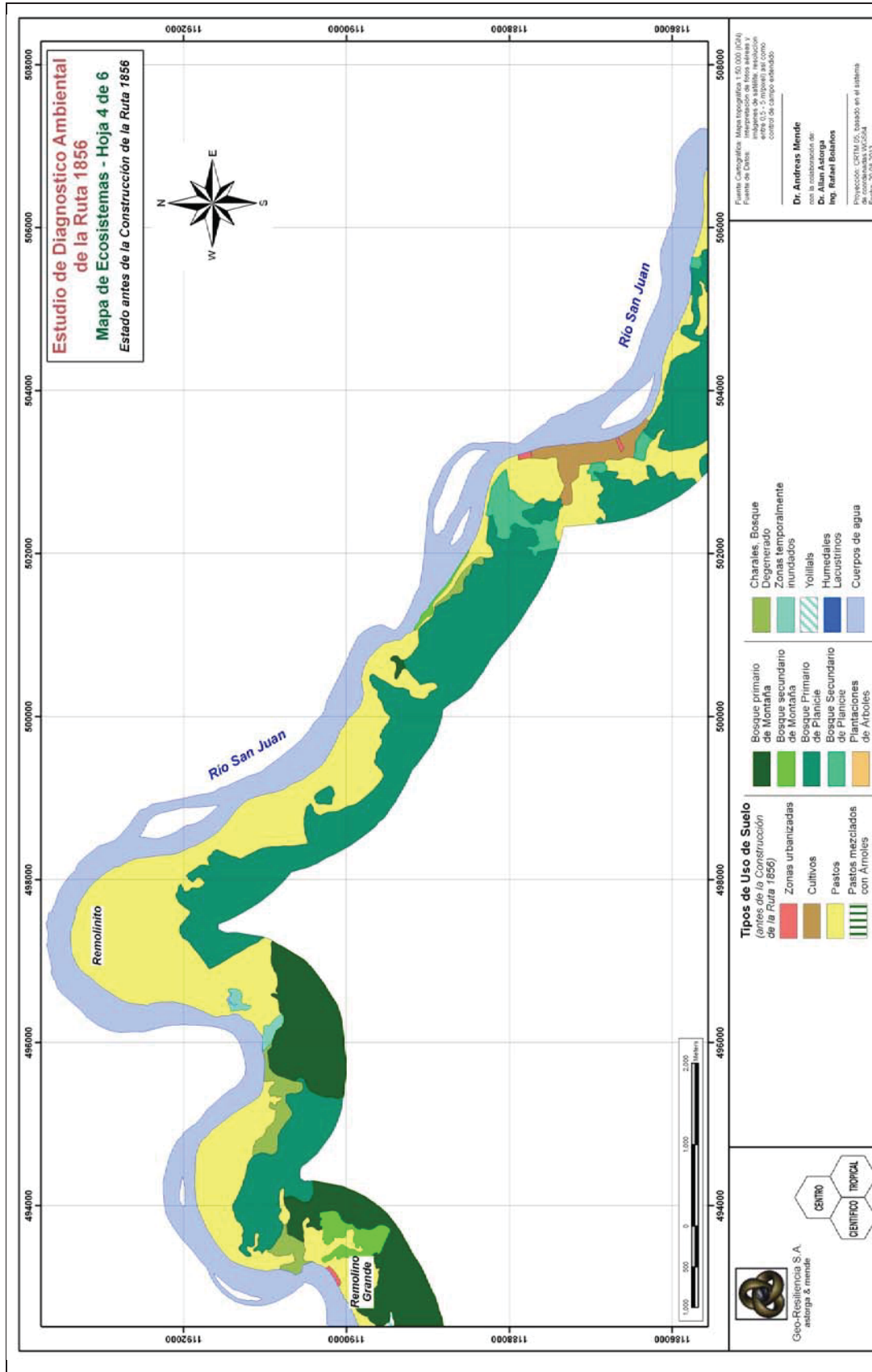


Fig. 7 a). Segment 4, de Remolino Grande au nord-ouest de Trinidad avant la construction de la route 1856.

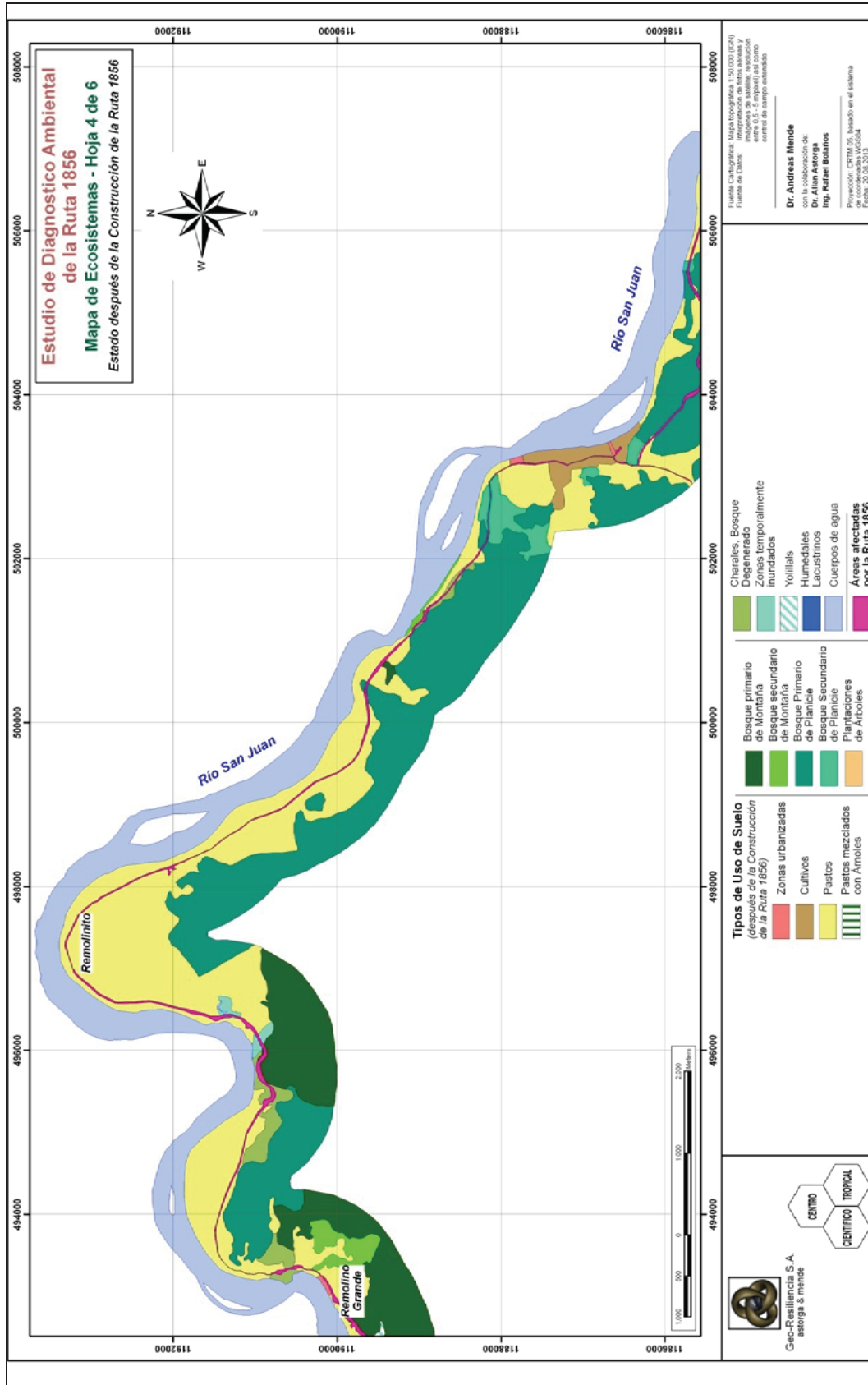


Fig. 7 b). Segment 4, de Remolino Grande au nord-ouest de Trinidad après la construction de la route 1856.

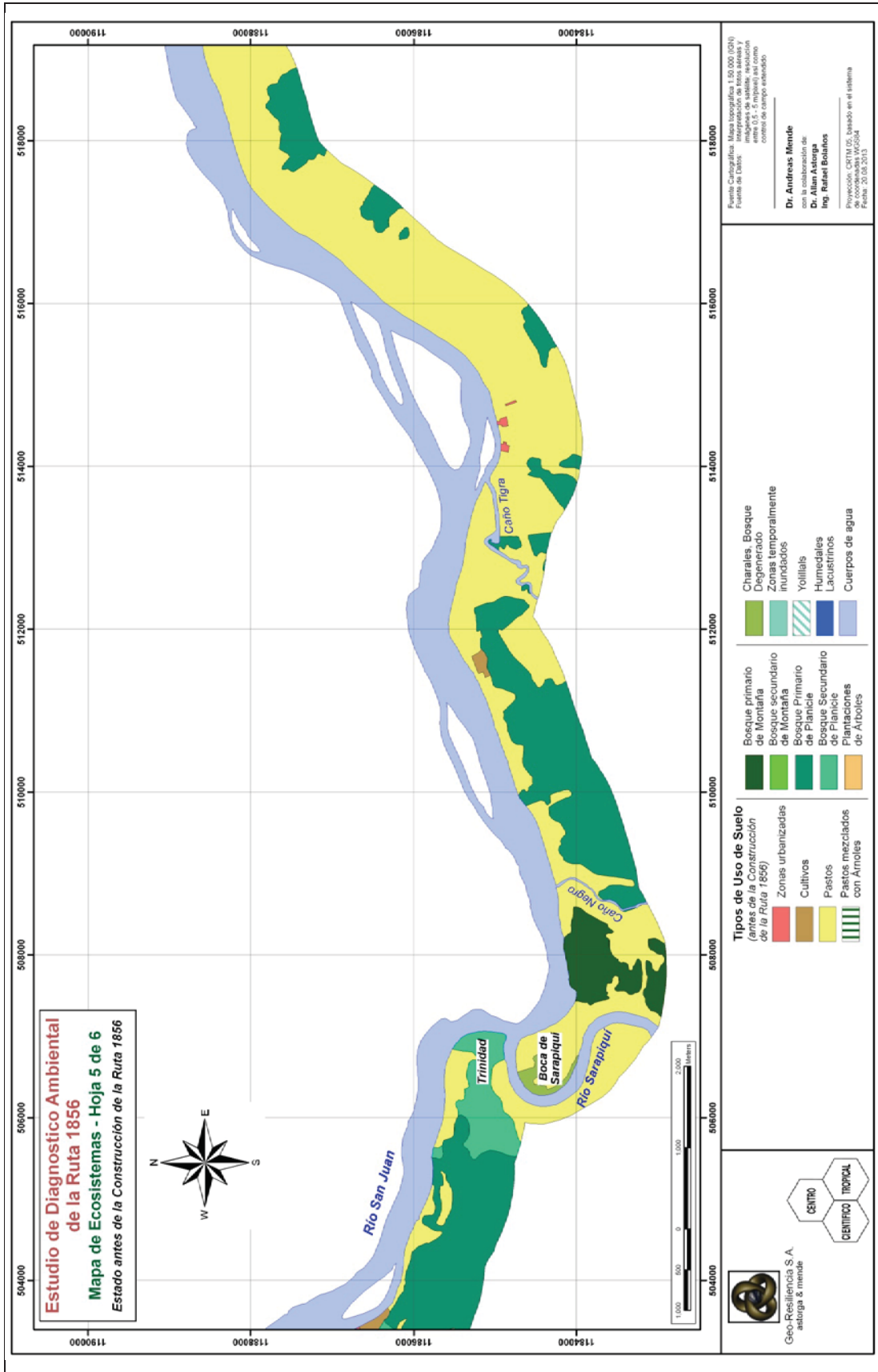


Fig. 8 a). Segment 5, du nord-ouest de Trinidad à l'ouest de Tigrá avant la construction de la route 1856.

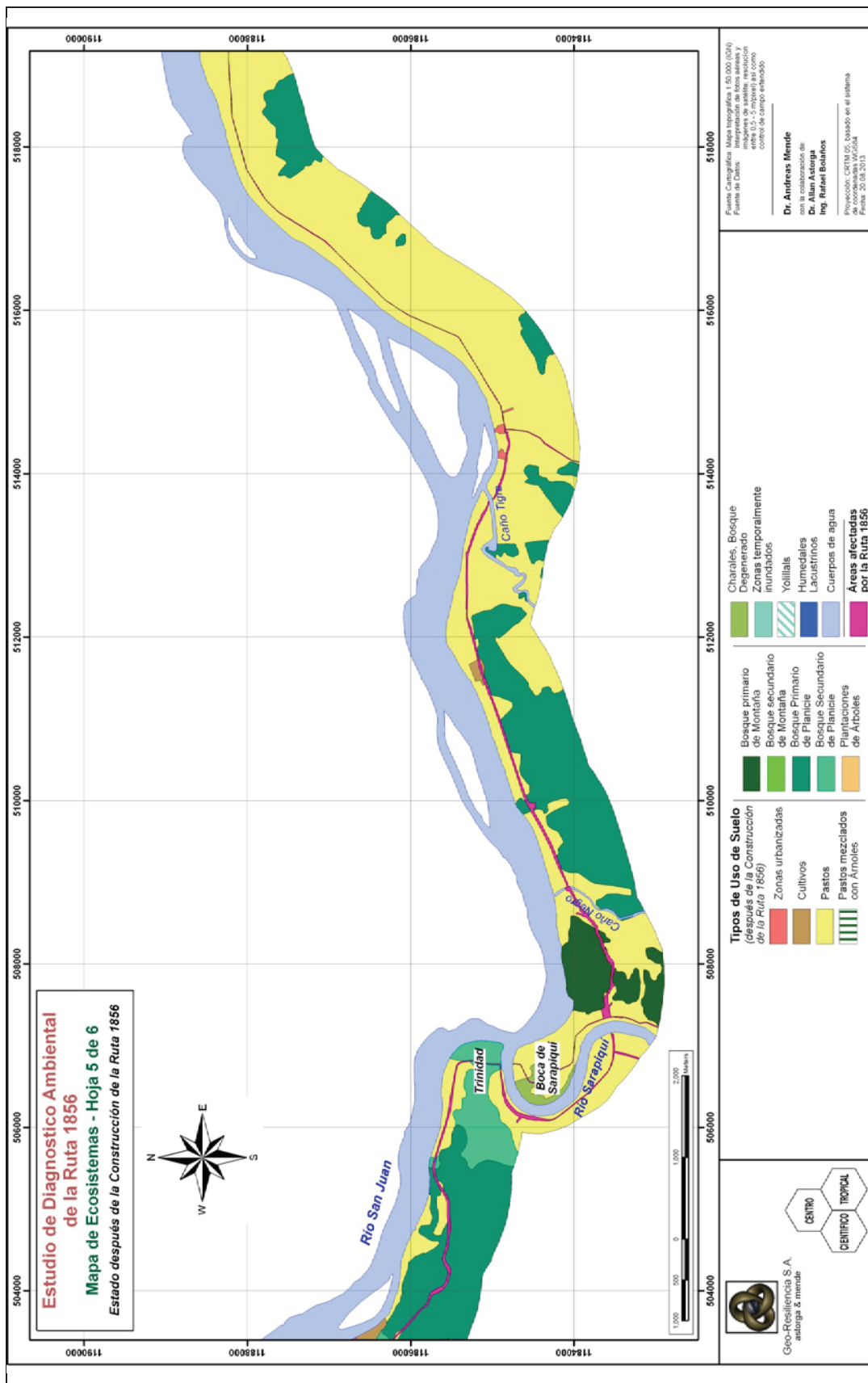


Fig. 8 b). Segment 5, du nord-ouest de Trinidad à l'ouest de Tigrá après la construction de la route 1856.



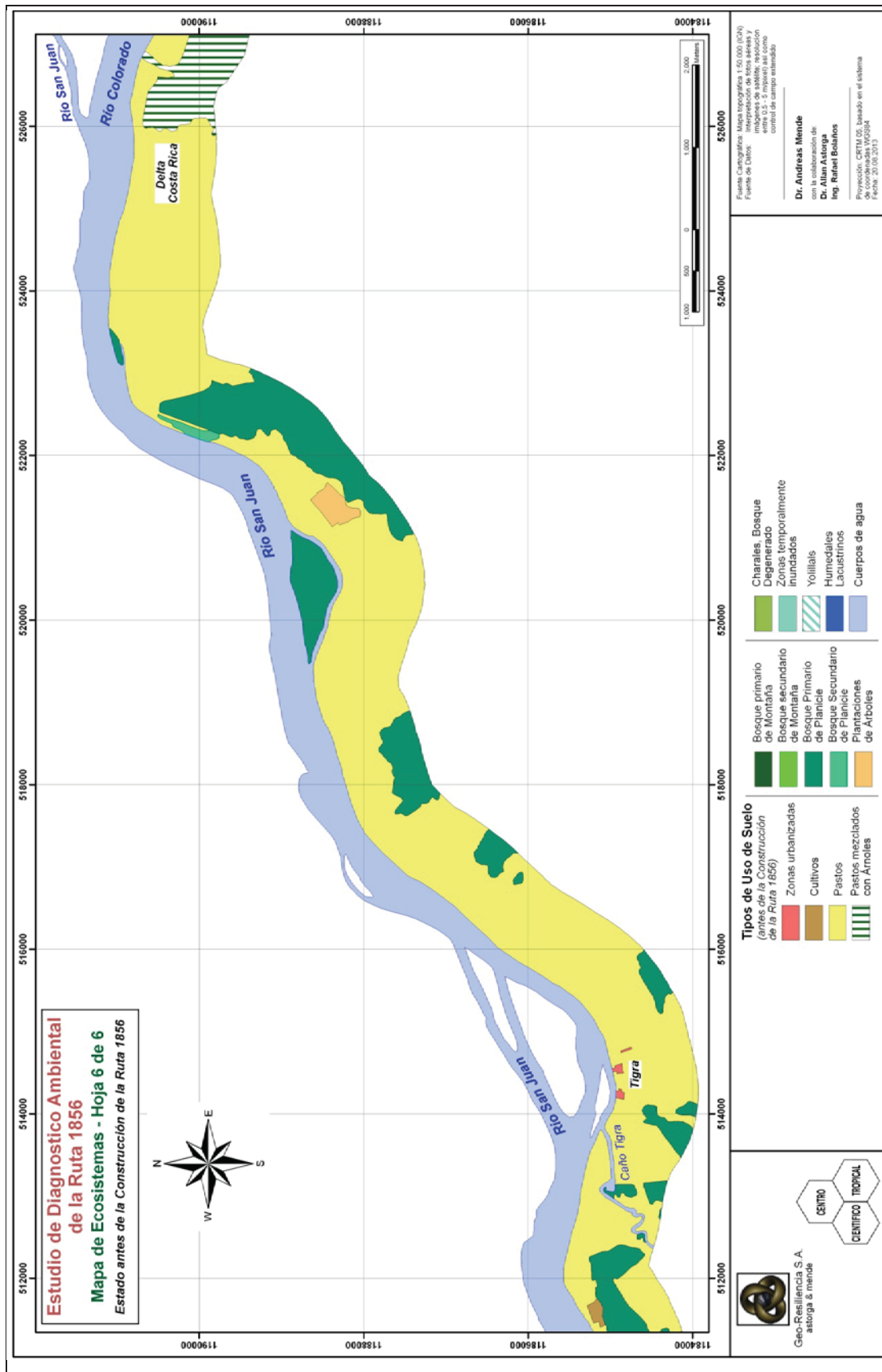


Fig. 9 a). Segment 6, de l'ouest de Tigrà à Delta Costa Rica avant la construction de la route 1856.

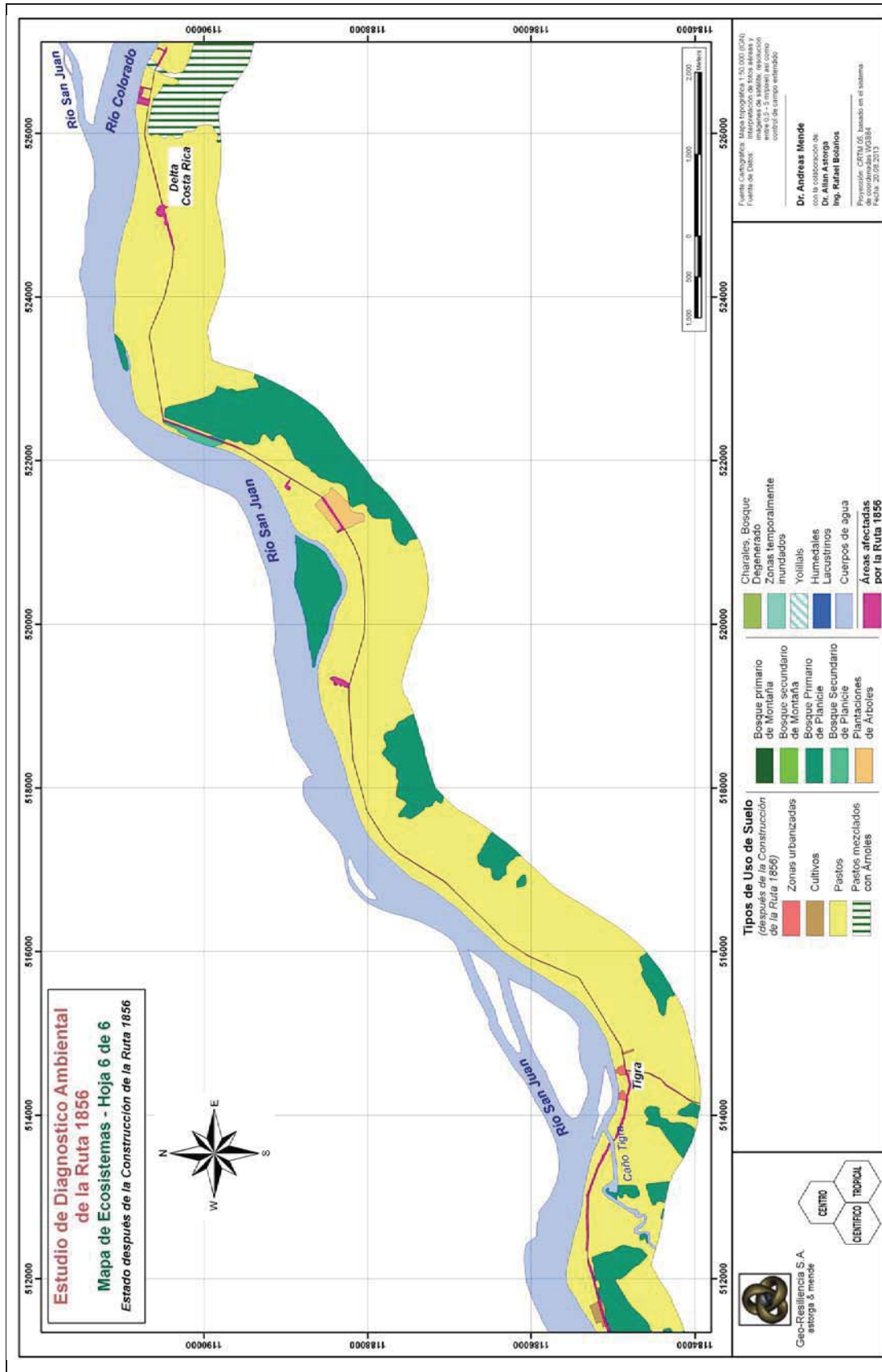


Fig. 9 b). Segment 6, de l'ouest de Tigua à Delta Costa Rica après la construction de la route 1856.

### 2.3. Synthèse des résultats

Le **tableau 2** présente les statistiques, obtenues à l'aide du système d'information géographique, des différentes catégories d'utilisation des sols avant la construction de la route 1856 sur la bande d'un kilomètre de large faisant l'objet de cette analyse, qui représente un total de 10 475,2 hectares, soit 104,75 km<sup>2</sup>.

Comme on peut l'observer dans le tableau 2, la catégorie d'utilisation des sols qui prédomine dans la zone étudiée correspond aux différents types de forêts, qui représentent 5 469,6 hectares, soit 54,70 % de la superficie totale. Les pâturages suivent avec 4 497,9 hectares, soit 44,98 % de la superficie totale. Les constructions (zones urbanisées) recouvrent 26,6 hectares, soit 0,3 % de la superficie totale.

**Tableau 2. Statistiques d'utilisation des sols avant la construction de la route 1856.**

Types d'utilisation des sols avant la construction de la route 1856	Superficie (ha)	Superficie (km2)	Superficie (%)
Zones urbanisées	26,6	0,27	0,3
Cultures annuelles/permanentes	67,5	0,68	0,6
Pâturages	4497,9	44,98	42,9
Zones de pâturages et d'arbres	103,1	1,03	1,0
Forêt montagneuse primaire	3598,3	35,98	34,4
Forêt montagneuse secondaire	211,4	2,11	2,0
Forêt primaire de plaine	1519,8	15,20	14,5
Forêt secondaire de plaine	140,1	1,40	1,3
Brousse, forêt dégradée.	89,5	0,89	0,9
Plantations d'arbres	15,9	0,16	0,2
Palmiers à raphia	150,4	1,50	1,4
Zones humides lacustres	18,0	0,18	0,2
Zones temporairement inondées	36,8	0,37	0,4
<b>TOTAL</b>	<b>10 475,2</b>	<b>104,75</b>	<b>100,00</b>

Le **tableau 3**, quant à lui, présente les statistiques obtenues grâce au système d'information géographique d'après l'interprétation des cartes d'utilisation des sols après la construction de la route 1856. Comme on peut le constater, la zone directement affectée par la construction de la route 1856 représente 350 hectares, soit 3,3 % de la superficie totale analysée.

Le **tableau 4** présente les statistiques des effets de la construction de la route 1856 sur les différents types d'utilisation des sols identifiés dans la zone étudiée (voir tableau 2). Comme on peut le constater, ce sont les pâturages qui sont la catégorie la plus affectée par la construction de la route 1856 (253,5 hectares, soit 72,4 % de la superficie totale). Les forêts (primaires et secondaires, de montagne et de plaine) affectées par la construction de la route représentent 83,2 hectares, soit 23,8 % de la superficie totale concernée.

**Tableau 3. Statistiques d'utilisation des sols après la construction de la route 1856.**

Types d'utilisation des sols avant la construction de la route 1856	Superficie (ha)	Superficie (km2)	Superficie (%)
Zones urbanisées	24,6	0,25	0,2
Cultures annuelles/permanentes	64,5	0,64	0,6
Pâturages	4244,4	42,44	40,5
Zones de pâturages et d'arbres	103,0	1,03	1,0
Forêt montagneuse primaire	3538,7	35,39	33,8
Forêt montagneuse secondaire	202,0	2,02	1,9
Forêt primaire de plaine	1511,0	15,11	14,4
Forêt secondaire de plaine	134,7	1,35	1,3
Brousse, forêt dégradée.	84,5	0,84	0,8
Plantations d'arbres	14,8	0,15	0,1
Palmiers à raphia	149,7	1,50	1,4
Zones humides lacustres	17,9	0,18	0,2
Zones temporairement inondées	35,4	0,35	0,3
Zones affectées par la route 1856	350	3,50	3,3
<b>TOTAL</b>	<b>10 475,2</b>	<b>104,75</b>	<b>100,00</b>

**Tableau 4. Evolution nette de l'utilisation des sols liée à la construction de la route 1856.**

Zones perdues au profit de la construction de la route 1856	Superficie (ha)	Superficie (km2)	Superficie (%)
Zones urbanisées	2,0	0,020	0,6
Cultures annuelles/permanentes	3,0	0,030	0,9
Pâturages	253,5	2,535	72,4
Zones de pâturages et d'arbres	0,1	0,001	0,0
Forêt montagneuse primaire	59,6	0,596	17,0
Forêt montagneuse secondaire	9,4	0,094	2,7
Forêt primaire de plaine	8,8	0,088	2,5
Forêt secondaire de plaine	5,5	0,055	1,6
Brousse, forêt dégradée.	5,0	0,050	1,4
Plantations d'arbres	1,1	0,011	0,3
Palmiers à raphia	0,7	0,007	0,2
Zones humides lacustres	0,1	0,001	0,0
Zones temporairement inondées	1,5	0,015	0,4
<b>TOTAL</b>	<b>350,2</b>	<b>3,50</b>	<b>100,00</b>



### 3. CONCLUSIONS

1. La zone occupée par la route 1856 entre la borne II et Delta Costa Rica représente 350,2 hectares.
2. Cela représente 3,3 % des 10 447,2 hectares que compte la zone étudiée (constituée d'un couloir d'un kilomètre de large allant de la borne II à Delta Costa Rica).
3. La zone de pâturage consacrée à la route 1856 représente 253,5 hectares, soit 72,4 % de la superficie totale de la zone désormais consacrée à cette route.
4. Compte tenu du fait que la végétation avait déjà été arrachée dans les pâturages et que ceux-ci avaient été aménagés à des fins agricoles avant la construction de la route 1856, l'impact de la construction de la route sur l'environnement, l'écologie, l'érosion des sols et la production de sédiments sur approximativement les trois quarts de sa longueur devrait être faible, voire négligeable.
5. La zone totale de forêts perdue au profit de la route 1856 représente 83,2 hectares, soit 23,8 % de la zone désormais consacrée à la route. Toutefois, seuls 68,4 hectares de la zone désormais consacrée à la route apparaissent sur les cartes comme relevant de forêts primaires avant la construction de la route et la majeure partie de cette superficie (59,56 hectares, soit 87 %) se situe en amont de l'embouchure du San Carlos.
6. En tout, la zone de forêts désormais consacrée à la route 1856 ne représente que 0,014 % des 5 869,6 hectares de forêts se trouvant dans le couloir étudié.
7. La superficie limitée de cette zone démontre que le tracé de la route 1856 a bien été planifié de façon à éviter autant que possible les forêts primaires. De surcroît, il ressort clairement de l'examen des cartes d'utilisation des sols présentées dans les figures 4 à 9 que la route contourne les zones boisées plutôt que de les traverser, en particulier en aval de l'embouchure du San Carlos.
8. En se fondant sur ce qui précède, notre conclusion est que l'impact de la route 1856 en matière d'utilisation des sols concerne essentiellement les pâturages et qu'en dépit du fait que 83,2 hectares de forêts sont désormais consacrés à la route, le tracé retenu a permis de limiter au minimum l'abattage de forêts primaires.

### 4. BIBLIOGRAPHIE

- Décret exécutif n° 32967 — (ministère de l'environnement et de l'énergie) **MINAE : Manuel d'instruments techniques destiné aux évaluations d'impact sur l'environnement («Manuel EIE»), partie III. Procédure technique d'intégration de la variable environnementale dans les plans réglementaires ou autres plans d'utilisation des sols.** (Journal officiel du 6 mai 2006.)
-

**ANNEXE 4**

**Régie costa-ricienne d'électricité (*Instituto costarricense de Electricidad, ICE*), projets  
d'exploitation stratégique et services associés, Centre d'études fondamentales  
en ingénierie, service de l'hydrologie, «Rapport sur l'hydrologie et  
les sédiments des bassins hydrographiques costa-riens  
dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan»,  
août 2013**

**Août 2013  
San José, Costa Rica**

**Préparé par :**

Federico Gómez Delgado  
Juan José Leitón Montero  
Carlos Aguilar Cabrera

**En collaboration avec :**

Sadí Laporte Molina  
José Alberto Zúñiga Mora  
Marcelo Avendaño Castro et l'unité URM  
José Francisco Fernández Araya et l'unité URM  
Berny Fallas López et l'unité UPA

## TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION .....	63
2. HYDROLOGIE ET MESURES DES SÉDIMENTS DANS LE SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN-COLORADO .....	64
2.1. Zone d'étude et stations de jaugeage .....	64
2.2. Débit mensuel moyen au niveau des différentes stations hydrologiques de l'ICE .....	66
2.3. Charge solide en suspension dans les bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan .....	69
2.3.1. Courbes de la charge solide en suspension pour les stations 01-03 La Trinidad et 11-04 Delta Colorado.....	70
2.3.2. Comportement saisonnier des concentrations de sédiments en suspension à hauteur de la station Delta Colorado (11-04).....	71
2.3.3. Charge annuelle moyenne de sédiments en suspension à hauteur des stations de jaugeage de La Trinidad (01-03) et Delta Colorado (11-04) .....	72
2.4. Charge de fond des bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan .....	73
3. BILAN HYDRAULIQUE DU SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN-COLORADO.....	76
4. RÉGIME HYDROLOGIQUE DES BASSINS AFFLUENTS CHARRIANT DES EAUX DU COSTA RICA VERS LE SAN JUAN, AVANT ET APRÈS LA CONSTRUCTION DE LA ROUTE 1856 .....	79
4.1. Zone imperméable des bassins se déversant dans le San Juan .....	80
4.2. Régime hydrologique de tous les fleuves et cours d'eau se déversant dans le San Juan depuis des bassins costa-riciens : évaluation de la route 1856 .....	82
5. ÉROSION DISTRIBUÉE ET APPORT SOLIDE DANS LE SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN-COLORADO .....	84
6. BILAN SÉDIMENTAIRE DU SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN-COLORADO, AVANT ET APRÈS LA CONSTRUCTION DE LA ROUTE 1856 .....	88
6.1. Total de la charge solide annuelle après la construction de la route 1856.....	89
6.2. Estimation de la charge solide produite par la route 1856.....	91
6.3. Diagrammes du bilan sédimentaire avant et après la construction de la route 1856.....	94
6.4. Processus d'envasement du cours inférieur du San Juan .....	97
7. CONCLUSIONS .....	98

Appendice A. Courbes de tarage des sédiments en suspension charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension charge annuelle moyenne des sédiments en suspension.....	102
Appendice B. Mesures du débit mensuel à l'aide d'un doppler à la hauteur de la station de jaugeage Delta Colorado (11-04) .....	127
Appendice C. Débit journalier à la hauteur de la station de jaugeage Delta Colorado (11-04) pour la période allant de décembre 2010 à juillet 2013 .....	128
Appendice D. Echantillons de sédiments en suspension (ss) prélevés à la hauteur des stations de jaugeage la trinidad (01-03, entre janvier 1974 et mars 1976) et delta colorado (11-04, entre décembre 2010 et juin 2013).....	129
Appendice E. Répartition de la taille des particules pour les échantillons de la charge de fonds prélevés – sur une base mensuelle pendant la période allant de décembre 2010 à juin 2013 – aux embouchures des fleuves san carlos et sarapiquí et à la hauteur de la station delta colorado (11-04) .....	130
Appendice F. Répartition des grains de taille moyenne sur le lit du fleuve et pourcentage de sable dans des échantillons prélevés entre décembre 2010 et juin 2013 à la hauteur de la station Delta Colorado (11-04) .....	193
Appendice G. Estimation, selon la méthode einstein, de la charge de fonds annuelle pour la période 2010-2013 dans le cours inférieur du San Juan et dans le Colorado .....	198
Appendice H. H.1. Diagramme de flux de données et description du modèle calsite ; H.2. Cartes d'entrée et de sortie produites pour déterminer l'érosion potentielle et l'apport solide dans les bassins de drainage costariciens et nicaraguayens .....	199
Appendice I. Diagrammes ventilés par composants de l'apport solide du bilan sédimentaire dans le système fluvial San Juan-Colorado avant et après la construction de la route 1856 ....	206



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Propriétés des stations hydrologiques de jaugeage situées sur les fleuves San Juan - Colorado et des stations hydrologiques de mesure de sédiments situées dans les bassins costa-riens se déversant dans le San Juan.	66
Tableau 2.	Propriétés des stations de jaugeage des sédiments installés dans les bassins costa-riens se déversant dans le San Juan	69
Tableau 3.	Apport hydraulique des bassins fluviaux costa-riens se déversant dans le fleuve San Juan - Colorado (ICE, 2010)	76
Tableau 4.	Valeurs des débits (venant des deux côtés de la frontière entre le Costa Rica et le Nicaragua) alimentant le fleuve San Juan - Colorado	77
Tableau 5	Augmentation maximale de la zone imperméable des bassins se déversant dans le San Juan depuis le Costa Rica	81
Tableau 6.	Régime du débit pour les microbassins se déversant dans le San Juan, sur la base d'une modélisation HEC-HMS entre 1976 ou 2013, en distinguant entre une configuration avec ou sans la route 1856	82
Tableau 7.	Régime de débit pour l'ensemble des bassins (micro et macro) se déversant dans le San Juan. Séries chronologiques générées entre 1971 et 2006 pour des conditions antérieures et postérieures à la construction de la route 1856.	83
Tableau 8.	Apports solides estimés des bassins costa-riens	85
Tableau 9.	Apports solides estimés pour les bassins nicaraguayens	87
Tableau 10.	Charge solide annuelle (incluant les sédiments en suspension et la charge de fonds) produite par le lac Nicaragua et les bassins se déversant dans le San Juan	90
Tableau 11.	Charges annuelles corrigées pour le lac Nicaragua et le système de bassins se déversant dans le San Juan.	91
Tableau 12.	Augmentation potentielle de la charge solide entraînée dans le San Juan en raison de la construction de la route 1856 (après discrétisation du bassin).	93
Tableau 13.	Augmentation de l'apport solide dans le fleuve dû à la construction de la route 1856 (après discrétisation du bassin)	94

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Stations hydrologiques et de mesure de sédiments situées dans les bassins costa-riens se déversant dans le San Juan ou bien dans le chenal principal de ce fleuve.	65
Figure 2.	Débit mensuel moyen enregistré dans les 14 stations de jaugeage de l'ICE réparties dans les trois principaux bassins fluviaux, ainsi que sur les fleuves San Juan et Colorado.	67
Figure 3.	Courbes de tarage des sédiments en suspension (SS) pour les stations de jaugeage La Trinidad (01-03) et Delta Colorado (11-04).	70
Figure 4.	Courbes de tarage des sédiments en suspension (SS) pour la station de jaugeage Delta Colorado (11-04) regroupées par saison climatique.	71
Figure 5.	Charge annuelle moyenne en sédiments en suspension à la hauteur de la station La Trinidad (01-03) – située directement sur le fleuve San Juan – comparée à l'estimation pondérée de la charge respective dans le fleuve San Juan, obtenue à partir des mesures effectuées à hauteur de la station Delta Colorado (11-04) située sur le fleuve Colorado juste après la bifurcation de ces deux cours d'eau.	72
Figure 6.	Distribution des fréquences du pourcentage en sable de tous les échantillons prélevés sur le lit.	73
Figure 7.	Courbe de tarage de la charge de fonds pour les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm à hauteur de la station Delta Colorado (11-04).	74
Figure 8.	Écoulement et régimes de la charge de fonds : Station 11-04 Delta Colorado (décembre 2010 – juillet 2013).	74
Figure 9.	Courbe de tarage de la charge de fonds pour les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm. Cours inférieur du San Juan.	75
Figure 10.	Écoulement et régimes de la charge de fonds : cours inférieur du San Juan (décembre 2010 - juillet 2013).	76
Figure 11.	Bilan hydraulique du système fluvial San Juan - Colorado.	78
Figure 12.	Bassins affluents se déversant dans le San Juan.	79
Figure 13.	Régime de débit des microbassins se déversant dans le San Juan, modélisation HEC-HMS pour la période allant de 1976 à 2013, dans des configurations incluant et excluant la route 1856.	83
Figure 14.	Régime hydrologique pour l'ensemble des bassins (micro et macro) se déversant dans le San Juan. Séries chronologiques générées entre 1971 et 2006 pour des conditions antérieures et postérieures à la construction de la route 1856.	84
Figure 15.	Apports solides spécifiques des bassins costa-riens se déversant dans le San Juan.	85
Figure 16.	Total des apports solides des bassins costa-riens se déversant dans le San Juan.	86
Figure 17.	Ratios de production des sédiments des bassins costa-riens se déversant dans le San Juan.	86
Figure 18.	Apport solide spécifique pour les bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan.	87

Figure 19.	Total des apports solides des bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan.	88
Figure 20.	Ratios de production des sédiments pour les bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan.	88
Figure 21.	Érosion potentielle générée par la plate-forme, ainsi que par les talus de déblai et de remblais, en raison de la construction de la route 1856 (ventilation par bassin d'affluent avec indication de la longueur de la portion de route associée à chaque bassin).	93
Figure 22.	Apports solides dans le San Juan dus à la construction de la route 1856 (ventilation par bassin d'affluent avec indication de la longueur de la portion de route associée à chaque bassin).	94
Figure 23.	Bilan sédimentaire annuel moyen avant la construction de la route 1856.	95
Figure 24.	Bilan sédimentaire annuel moyen après la construction de la route 1856.	96
Figure 25.	Les augmentations de la charge solide moyenne entrant dans le système fluvial San Juan - Colorado en raison de la construction de la route 1856.	97

## 1. INTRODUCTION

Le présent rapport a été préparé à la demande de l'honorable Laura Chinchilla Miranda, Présidente de la République du Costa Rica et de l'honorable José Enrique Castillo Barrantes, ministre des Affaires étrangères de la République du Costa Rica. Il vise à fournir les informations techniques nécessaires au Gouvernement du Costa Rica pour répondre à la requête introduite contre lui par le Gouvernement du Nicaragua devant la Cour internationale de justice (CIJ) à La Haye, Pays-Bas.

Les paragraphes qui suivent présentent les trois principaux auteurs du rapport :

**Federico Gómez Delgado** est un hydrologue diplômé en ingénierie civile de l'université du Costa Rica où il a également obtenu un mastère [*Magister Scientiae*] en statistiques. Il a ensuite obtenu un doctorat en hydrologie à l'école doctorale SIBAGHE de l'université de Montpellier, France. En 2002, il a commencé à travailler pour le service d'hydrologie de l'Institut costa-ricien d'électricité (ICE selon son acronyme espagnol), avant de rejoindre l'unité de planification de l'expansion intégrée du système électrique. Il a été nommé ensuite coordinateur du service d'hydrologie, puis directeur du centre pour les études d'ingénierie de base de l'ICE. Entre autres fonctions, M. Gómez a présidé le Comité national pour l'hydrologie et la météorologie, a siégé au Conseil météorologique national, a assuré le rôle de conseiller hydrologique du représentant permanent du Costa Rica auprès de l'OMS et a également présidé le Comité national costaricain pour le Programme hydrologique international de l'UNESCO (PHI)

**Juan José Leitón Montero** est un ingénieur civil travaillant actuellement pour l'Institut costa-ricien d'électricité (ICE). Il occupe le poste d'assistant – spécialisé en hydrologie/hydraulique – dans le cadre de projets hydroélectriques depuis 2010 et, depuis 2012, travaille comme enquêteur auprès du département hydrologique du centre pour les études d'ingénierie de base de l'ICE. Il a obtenu un diplôme avec mention de l'université du Costa Rica (2012) et participe au programme d'études supérieures en mathématiques privilégiant les mathématiques appliquées dans la même institution.

**Carlos Andrés Aguilar Cabrera** est étudiant en dernière année en ingénierie civile et physique théorique à l'université du Costa Rica. Il a travaillé comme assistant au service d'hydrologie de l'ICE et a également participé à des études sur le terrain en qualité d'assistant du Centre de recherche en développement durable de l'université du Costa Rica (dont l'acronyme espagnol est CIEDES). Il a acquis une expérience en matière d'ingénierie hydraulique, d'hydrologie et de physique des sols dans le cadre du programme standard d'ingénierie civile considéré comme essentiellement équivalent par le bureau canadien d'accréditation des programmes d'ingénierie.

L'Institut costa-ricien d'électricité (ICE) est un institut national dédié à l'identification, à la conception, au développement et à l'exploitation de projets d'électricité et de télécommunication dans le but de fournir ses services à la société. Depuis la fondation de l'institut en 1949, son service électrique s'est spécialisé dans les mesures et les études hydrologiques et sédimentologiques conformes aux normes techniques et scientifiques de classe mondiale et a mené des projets dans bon nombre de bassins et de microbassins du pays.

Dans deux des grands bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan – à savoir le San Carlos et le Sarapiquí –, l'ICE a construit plusieurs installations hydroélectriques d'importance stratégique pour le pays. Les informations hydro-sédimentologiques les plus pertinentes collectées par l'institut ces dernières décennies sont reprises dans le présent rapport qui inclut également les données enregistrées pendant près de trois ans dans une station de jaugeage située à Delta Costa Rica, ainsi que l'analyse descriptive et déductive de l'ensemble. De plus, sur la base du savoir et de l'expérience accumulés par l'ICE concernant les processus hydro-sédimentologiques caractéristiques des bassins fluviaux de cette région, le rapport inclut un chapitre indiquant

l'écoulement (débit) annuel du système fluvial San Juan - Colorado en se fondant sur des mesures effectuées directement par lui-même ou par l'Institut nicaraguayen d'études territoriales (INETER). Nous présentons également une analyse du régime hydrologique des bassins costa-riens se déversant dans le San Juan, laquelle contient une partie dédiée à l'évaluation hydrologique de la route 1856. Les processus d'érosion distribuée et de transport des sédiments ont été modélisés à l'aide d'une méthodologie scientifique de haut niveau (cet exercice ayant été facilité par les observations sédimentologiques effectuées au cours des dernières décennies dans les bassins costa-riens en vue de calibrer le modèle en question), avant d'estimer l'apport solide des bassins fluviaux se déversant dans le San Juan. Enfin, le rapport présente le bilan sédimentaire de l'intégralité du système de bassin fluvial en consacrant une analyse spécifique à la route 1856.

Tout au long des chapitres du présent rapport, il devient évident que le bassin du San Juan est un vaste système au niveau local, lequel est régi par des processus naturels de grande ampleur à la fois sur les plans spatial et temporel. La variabilité inhérente aux processus de ce type implique que leur quantification à l'issue de calculs fondés sur une méthodologie scientifique éprouvée ne peut être qu'approximative. Différentes sections du présent rapport démontrent que les effets hydrologiques et sédimentologiques de la construction de la route 1856 sont non seulement minuscules par rapport à l'ordre de grandeur des processus naturels caractérisant le système fluvial du San Juan, mais tombent même dans la marge d'erreur de la quantification desdits processus, à savoir qu'ils sont indétectables et que l'impact de la route sur les débits de l'eau, les charges solides, les concentrations de sédiments, la sédimentation et la morphologie du San Juan, est non seulement insignifiant, mais indiscernable en pratique.

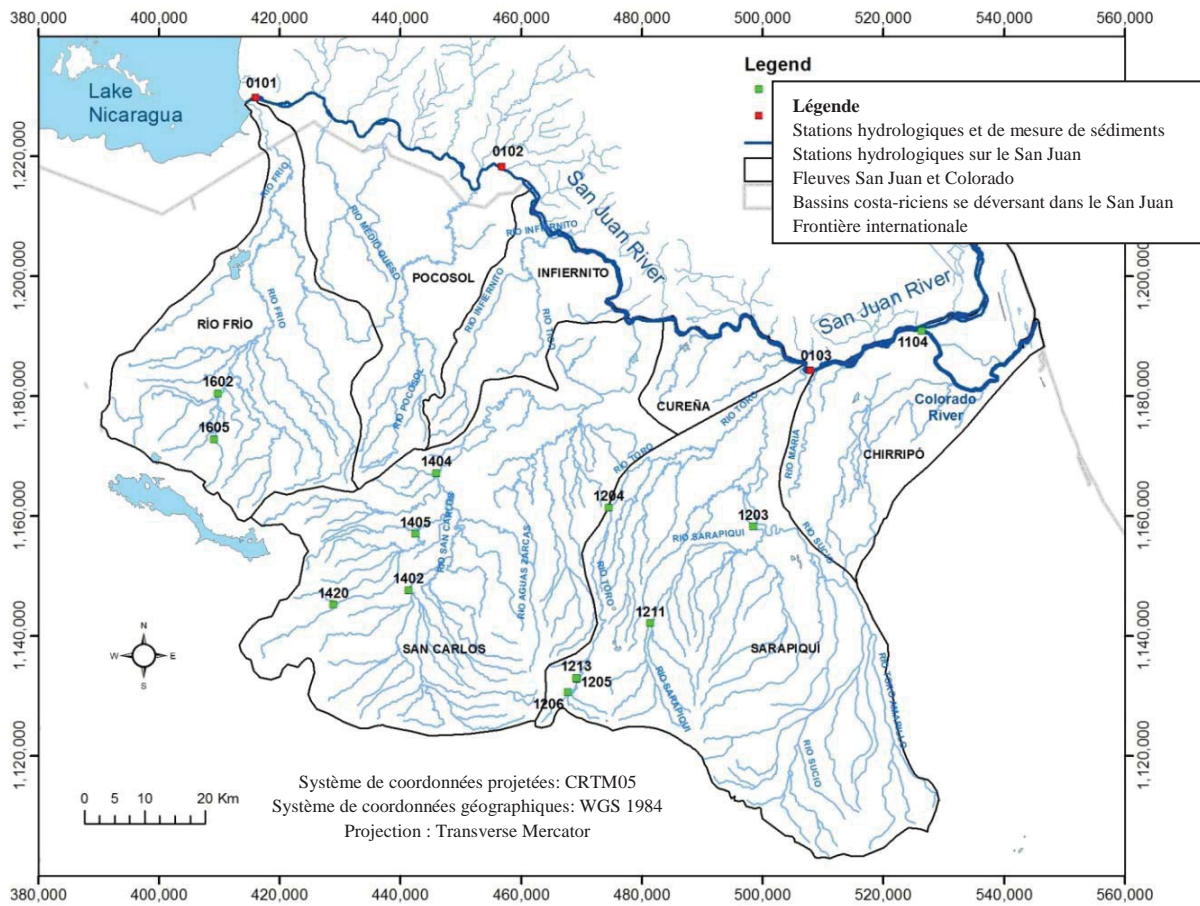
## **2. HYDROLOGIE ET MESURES DES SÉDIMENTS DANS LE SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN - COLORADO**

Le présent chapitre décrit les différentes mesures hydrologiques et sédimentaires auxquelles a procédé l'ICE dans les divers bassins fluviaux se déversant dans le système du bassin San Juan - Colorado.

### **2.1. Zone d'étude et stations de jaugeage**

Au fil du temps, l'ICE a installé douze stations de jaugeage destinées à mesurer les flux d'eau et de sédiment dans trois des sept bassins costa-riens se déversant dans le San Juan : celui du Frío, celui du San Carlos est celui du Sarapiquí. En outre, trois stations de décharge ont été déployées directement sur le San Juan, tandis que, fin 2010, l'ICE a installé une station de jaugeage du débit et de la charge solide sur le Colorado, juste en aval de la bifurcation du San Juan à la hauteur de Delta Costa Rica. L'emplacement de ces seize stations, ainsi que la délimitation des sept principaux bassins fluviaux costa-riens se déversant dans le San Juan sont indiqués dans la figure 1.





**Figure 1.** Stations hydrologiques et de mesure de sédiments situées dans les bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan ou bien dans le chenal principal de ce fleuve.

En outre, pour chacune de ces stations, le tableau 1 présente des informations pertinentes comme la zone de drainage de l’affluent, le temps pendant lequel des mesures ont été prises et le débit moyen du fleuve enregistré au cours de la période correspondante.

**Tableau 1.** Propriétés des stations hydrologiques de jaugeage situées sur les fleuves San Juan - Colorado et des stations hydrologiques de mesure de sédiments situées dans les bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan.

Code de la station	Nom de la station	Fleuve	Bassin	Zone de drainage DA (km <sup>2</sup> )	Période de l'enregistrement	Q (m <sup>3</sup> /s)	Active jusqu'à aujourd'hui
01-01 <sup>a</sup>	San Carlos	San Juan	San Juan	30 306 <sup>c</sup>	1965-1986 <sup>c</sup>	297 <sup>c</sup>	Non
01-02 <sup>a</sup>	El Castillo	San Juan	San Juan	32 819 <sup>d</sup>	1971-1981 1997-1998 <sup>b</sup>	422 <sup>b</sup>	Non
01-03	La Trinidad	San Juan	San Juan	38 730 <sup>e</sup>	1973-1976 <sup>e</sup>	1 123	Non
11-04	Delta Colorado	Colorado	San Juan	-	2010-2013	1 026	Oui
12-03	Puerto Viejo	Sarapiquí	Sarapiquí	845	1968-1999	113	Non
12-04	Veracruz	Toro	Sarapiquí	191	1971-2013	26	Oui
12-05	Bajos del Toro	Toro	Sarapiquí	73	1985-1996	6,7	Non
12-06	Toro	Toro	Sarapiquí	41	1993-2013	4,4	Oui
12-11	San Miguel	Volcán	Sarapiquí	59	1998-2002 2010-2013	11	Oui
12-13	Rio Segundo	Segundo	Sarapiquí	17	1999-2013	2,7	Oui
14-02	Jabillos	San Carlos	San Carlos	552	1963-2013	51	Oui
14-04	Terrón Colorado	San Carlos	San Carlos	1 556	1968-2008	166	Non
14-05	Peñas Blancas	Peñas Blancas	San Carlos	293	1968-2013	35 <sup>f</sup>	Oui
14-20	Pocosol	Peñas Blancas	San Carlos	124	1980-2013	19	Oui
16-02	Guatuso	Frío	Frío	253	1969-2013	28	Oui
16-05	Santa Lucia	Venado	Frío	34	1982-2013	3,9	Oui

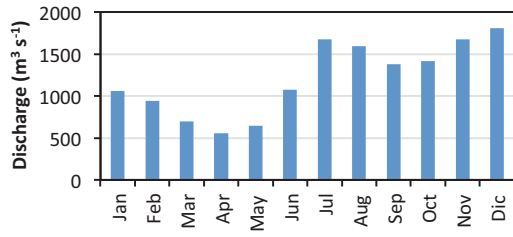
Remarque : DA = zone de drainage ; Q = Débit moyen annuel

<sup>a</sup>Stations installées, codées et exploitées par INETER, Nicaragua ; <sup>b</sup>INETER (2001) ; <sup>c</sup>INETER (2001) ; <sup>d</sup>INETER (2001) ; <sup>e</sup>ICE (1973) ; <sup>f</sup>Depuis 2002, les débits sont régulés par la centrale hydroélectrique de Peñas Blancas.

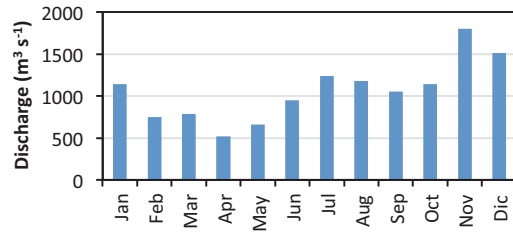
## 2.2. Débit mensuel moyen au niveau des différentes stations hydrologiques de l'ICE

Pour les périodes indiquées dans le tableau 1, le débit mensuel moyen du fleuve à chaque station a été calculé et représenté sous forme graphique dans la figure 2. En particulier, la station Delta Colorado a procédé à une enquête spéciale au cours de laquelle 30 échantillons de débit ont été prélevés entre décembre 2010 et juin 2013.

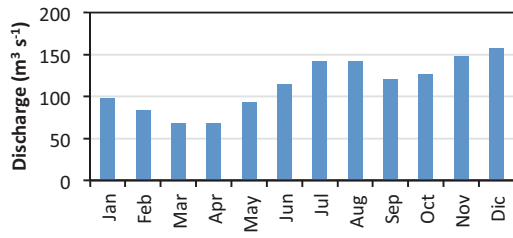
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 01-03



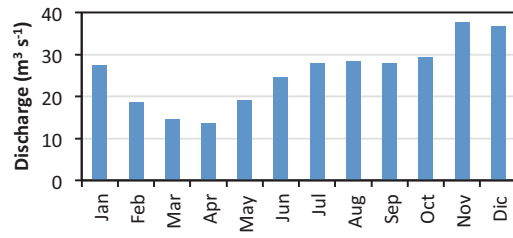
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 11-04



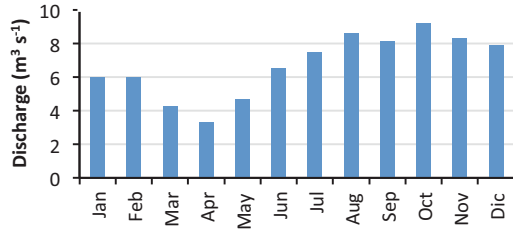
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 12-03



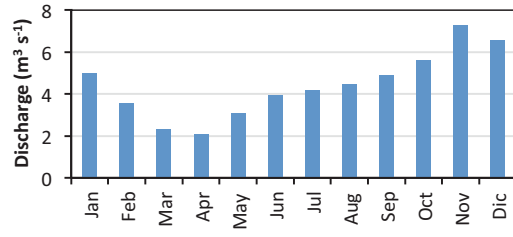
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 12-04



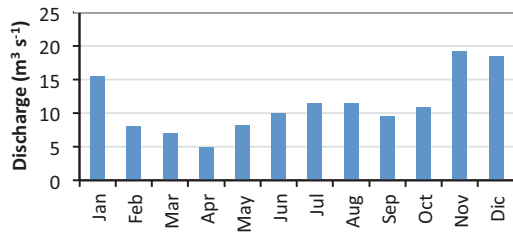
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 12-05



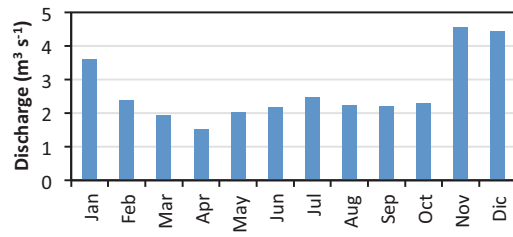
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 12-06



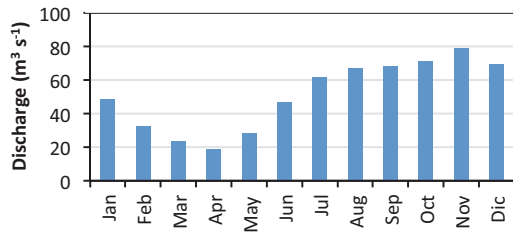
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 12-11



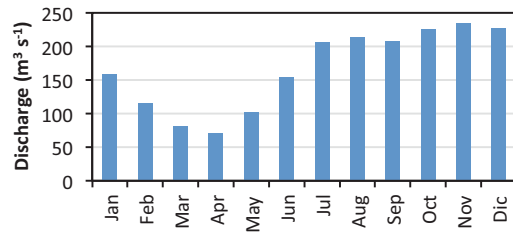
Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 12-13

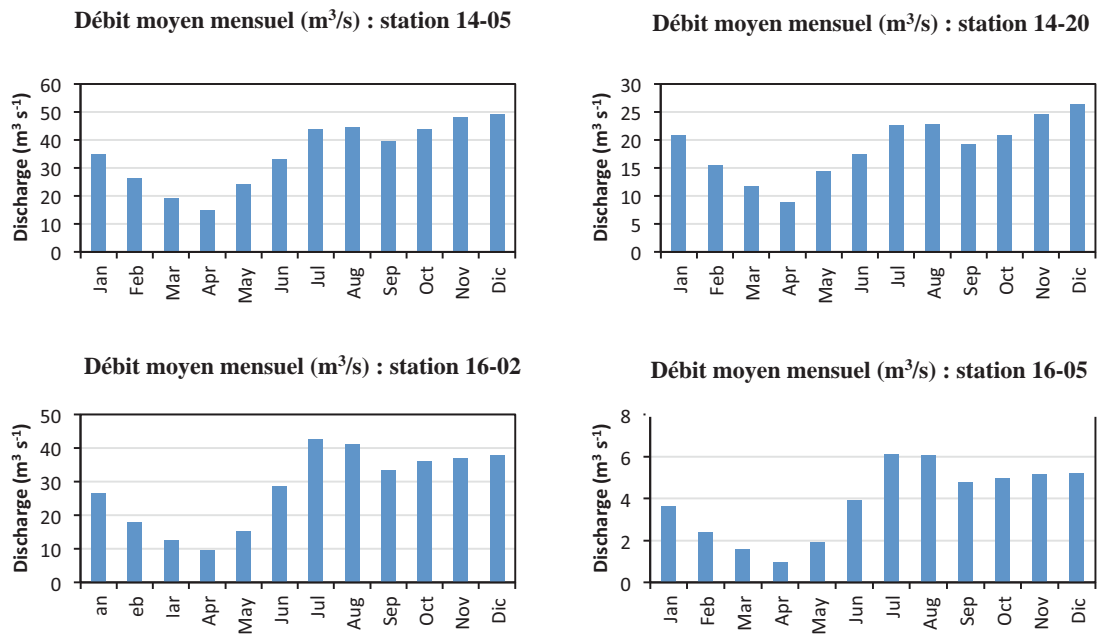


Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 14-02



Débit moyen mensuel (m<sup>3</sup>/s) : station 14-04





Légende : Discharge ( $m^3 s^{-1}$ ) = Débit ( $m^3/s$ )

**Figure 2.** Débit mensuel moyen enregistré dans les 14 stations de jaugeage de l'ICE réparties dans les trois principaux bassins fluviaux, ainsi que sur les fleuves San Juan et Colorado.

### 2.3. Charge solide en suspension dans les bassins costa-riens se déversant dans le San Juan

Les charges mensuelles et annuelles solides en suspension ont été calculées pour les 14 stations appartenant à l'ICE, telles qu'elles sont réparties dans les bassins se déversant dans le San Juan. Ces charges se fondent sur les courbes hauteur – débit créées sur la base des données d'échantillonnage collectées au fil du temps par l'institut. Les échantillons ont été prélevés selon des procédures standards dans tous les sites disposant d'une station de jaugeage appartenant à l'ICE.

A l'exception des stations 01-03 et 11-04, l'information décrite plus haut se retrouve dans le tableau 2 et dans l'appendice A pour toutes les stations de jaugeage de l'ICE répertoriées dans le tableau 1. Aux fins spécifiques de la comparaison des concentrations de charges solides mensuelles mesurées à la station La Trinidad (01-03) (au cours de la période 1973-1976) à celles mesurées à la station Delta Colorado (11-04) (au cours de la période 2010-2013), cette information est présentée séparément dans les sections 2.3.1 et 2.3.3. L'objectif de cette comparaison est de déterminer s'il existe une différence statistiquement significative entre les concentrations de charges solides enregistrées dans ces sites de jaugeage très proches les uns des autres et celles enregistrées dans les chenaux suivants du San Juan et du Colorado. La comparaison a été effectuée sur le même système fluvial, à deux périodes différentes : sur le San Juan bien avant la construction de la route 1856 (dans les années 1970) et sur le Colorado juste après la construction de cette même route (à compter de décembre 2010).

**Tableau 2.** Propriétés des stations de jaugeage des sédiments installés dans les bassins costa-riens se déversant dans le San Juan

Code de la station	Nom de la station	Bassin	Fleuve	Nbre d'échant.	Période d'échantillonnage	SSL (t/an) <sup>o</sup>	SY (t/ha/an)
01-03	La Trinidad	San Juan	San Juan	12	1974-1976	7 995 000	1.92
11-04	Delta Colorado	San Juan	Colorado	31	2010-2013	5 981 000 <sup>a</sup>	-
12-03	Puerto Viejo	Sarapiquí	Sarapiquí	264	1970-1998	165 500	1.96
12-04	Veracruz	Sarapiquí	Toro	285	1972-2012	101 000	5.29
12-05	Bajos del Toro	Sarapiquí	Toro	137	1985-2001	50 000	6.85
12-06	Toro	Sarapiquí	Toro	117	1995-2010	20 500	5.00
12-11	San Miguel	Sarapiquí	Volcán	47	1998-2010	23 000	3.90
12-13	Río Segundo	Sarapiquí	Segundo	25	1999-2009	1 800	1.06
14-02	Jabillos	San Carlos	San Carlos	338	1967-2011	600 000	10.9
14-04	Terrón Colorado	San Carlos	San Carlos	53	1998-2009	1 300 000	8.35
14-05	Peñas Blancas	San Carlos	Peñas Blancas	308	1970-2011	157 000	5.36
14-20	Pocosol	San Carlos	Peñas Blancas	278	1980-2012	358 000	28.9
16-02	Guatuso	Frío	Frío	361	1970-2012	60 800	2.40
16-05	Santa Lucía	Frío	Venado	153	1984-2011	8 100	2.38

Remarque : SSL [*suspended sediment load*] = Charge solide en suspension ; SY [*specific yield*] = Porosité efficace

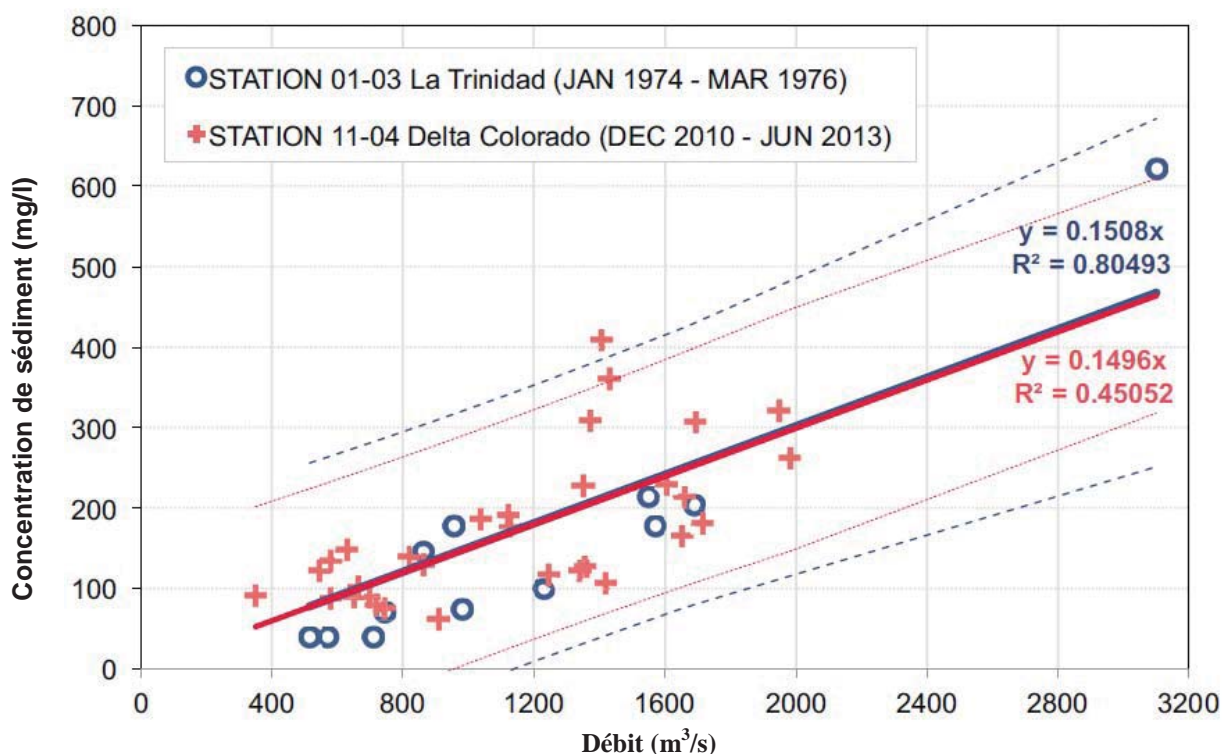
<sup>a</sup>Cette valeur est mesurée sur le fleuve Colorado et n'est donc pas directement comparable avec la charge solide en suspension mesurée à la hauteur de la station La Trinidad (01-03).



### 2.3.1. Courbes de la charge solide en suspension pour les stations 01-03 La Trinidad et 11-04 Delta Colorado

Des échantillons de charges solides en suspension ont été prélevés par l'ICE dans deux stations (La Trinidad 01-03 et Delta Colorado 11-04, appendice D et figure 1) placées à l'endroit idéal pour estimer les changements possibles dans la tendance du débit et de la concentration des sédiments dans le système fluvial San Juan - Colorado. La figure 3 présente les courbes de tarage des sédiments en suspension de deux stations de jaugeage, ainsi que leurs intervalles respectifs de confiance à 95 %.

La relation entre le débit et la concentration de sédiments en suspension (SS) n'étant pas directement fonction du débit total et les concentrations en sédiments suspendus n'ayant subi aucune modification due à la bifurcation du San Juan entre son cours inférieur d'une part et le Colorado d'autre part (cette concentration pouvant être considérée comme homogène dans les deux fleuves), on pourrait s'attendre à ce que toute modification significative de la relation débit - SS ressorte dans la comparaison des courbes de tarage respectives de ces deux stations de jaugeage. Toutefois, selon la figure 3, les courbes de tarage de deux stations sont singulièrement analogues et démontrent que la dynamique débit-sédiments ne varie ni dans l'espace (entre La Trinidad et Delta Colorado), ni dans le temps (dès lors que l'on compare les mesures faites dans les années 1970 à celles faites depuis décembre 2010). De plus, en raison de la variabilité élevée de la relation entre le débit et la concentration de SS, l'incertitude entourant les courbes de tarage est très élevée, ce qui se traduit par des intervalles de confiance très larges concernant les valeurs prévues moyennes telles qu'elles sont représentées dans les courbes de régression les mieux ajustées de la figure 3.

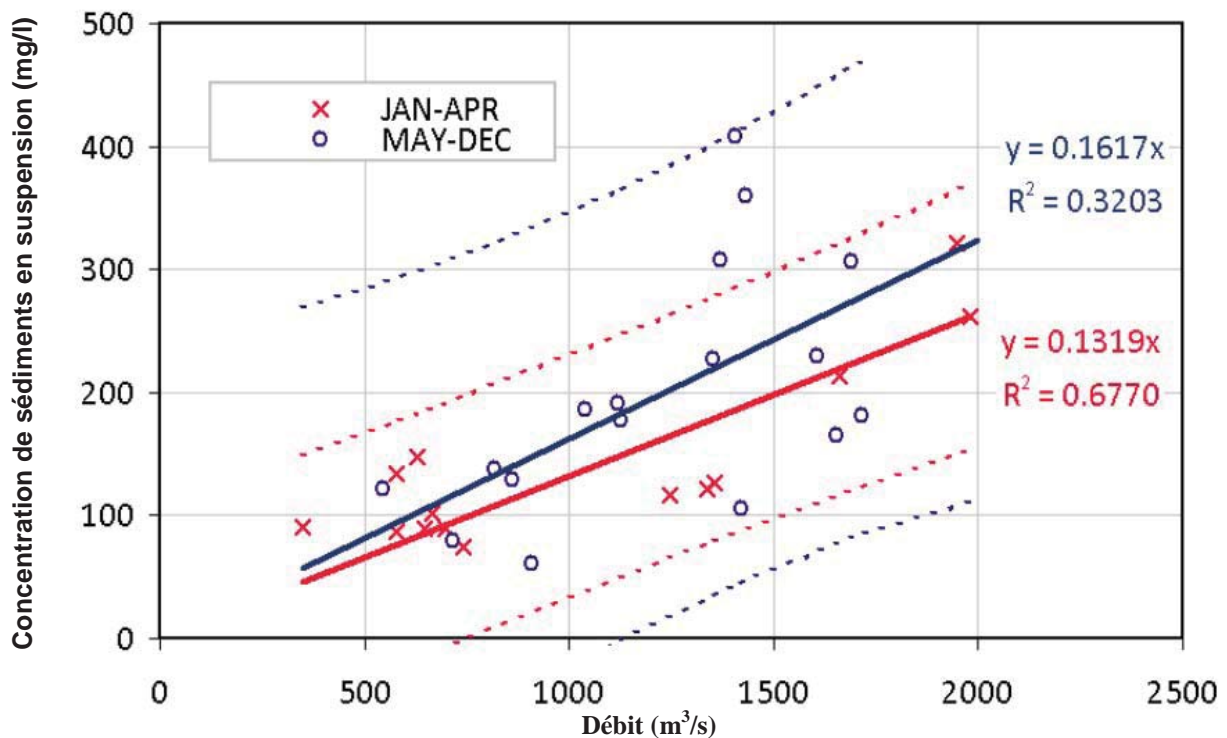


**Figure 3.** Courbes de tarage des sédiments en suspension (SS) pour les stations de jaugeage La Trinidad (01-03) et Delta Colorado (11-04). Les deux lignes continues représentent les modèles de régression adaptés aux ensembles de données, pour les deux stations de jaugeage. Les lignes en pointillés représentent l'intervalle de confiance à 95 % de la réaction moyenne prévue par chacun des modèles de régression.

Le fait que les zones de confiance des deux courbes de tarage se chevauchent complètement (dans les zones comprises entre les lignes pointillées correspondantes de la figure 3) signifie que l'on peut conclure, avec une confiance à 95 %, à l'absence de preuves statistiques d'une différence entre les deux courbes ; en d'autres termes, aucune preuve scientifique ne soutient l'hypothèse suggérant un changement dans la relation naturelle entre débit et concentration de sédiments en suspension le long du système San Juan entre les deux périodes d'échantillonnage : l'une située bien avant la construction de la route 1856 (1974-1976) et l'autre après (2010-2013).

### 2.3.2. Comportement saisonnier des concentrations de sédiments en suspension à hauteur de la station Delta Colorado (11-04)

Les échantillons de sédiments en suspension (SS) prélevés à hauteur de la station Delta Colorado (11-04) ont été également regroupés par saison climatique : saison sèche (de janvier à avril) et saison des pluies (de mai à décembre). La figure 4 présente les courbes de tarage SS correspondantes. Selon les intervalles respectifs de confiance à 95 %, aucune preuve statistique n'étaye la proposition selon laquelle la saison sèche et la saison des pluies présenteraient des relations débit – concentration en SS différentes.



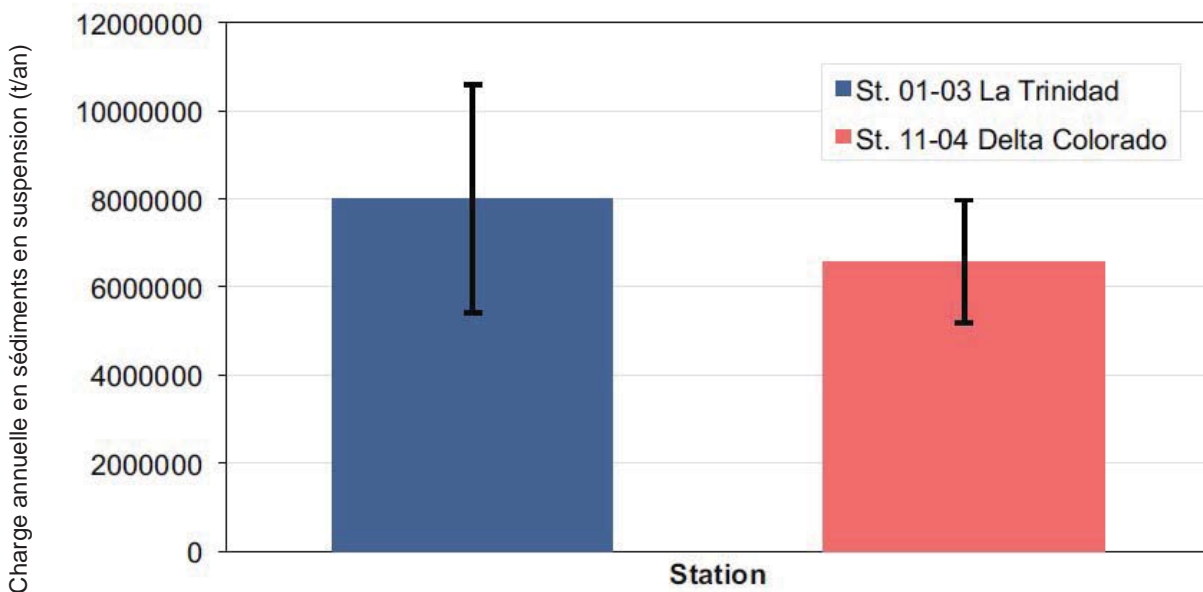
**Figure 4.** Courbes de tarage des sédiments en suspension (SS) pour la station de jaugeage Delta Colorado (11-04) regroupées par saison climatique. Les deux lignes continues représentent les modèles de régression adaptés aux relations débit – concentration en SS pour la saison sèche (janvier à avril) et la saison des pluies (mai à décembre). Les lignes en pointillés représentent l'intervalle de confiance à 95 % dans la prévision de la réaction moyenne calculée à l'aide de chacun des modèles de régression.

### 2.3.3. Charge annuelle moyenne de sédiments en suspension à hauteur des stations de jaugeage de La Trinidad (01-03) et Delta Colorado (11-04)

Les charges de sédiments en suspension dans le San Juan ont été calculées pour deux périodes extrêmement différentes : la première comprise entre 1974 et 1976 (station La Trinidad, 01-03) et la seconde entre 2010 et 2012 (station Delta Colorado, 11-04), avec des données pondérées pour estimer la charge de sédiments en suspension uniquement dans le San Juan).

Les charges annuelles de sédiments en suspension se sont avérées analogues pour les deux périodes d'enregistrement, avec une valeur moyenne de 7 995 000 t/an selon un intervalle de confiance à 95 % compris entre 5 405 000 et 10 585 000 t/an [charge annuelle estimée en SS dans le San Juan selon la station La Trinidad (01-03) pour la période comprise entre 1974 et 1976] et une valeur moyenne de 6 573 000 t/an selon un intervalle de confiance à 95 % compris entre 5 181 000 à 7 966 000 t/an [charge annuelle estimée en SS dans le San Juan selon la station Delta Colorado (11-04) entre 2010 et 2012].

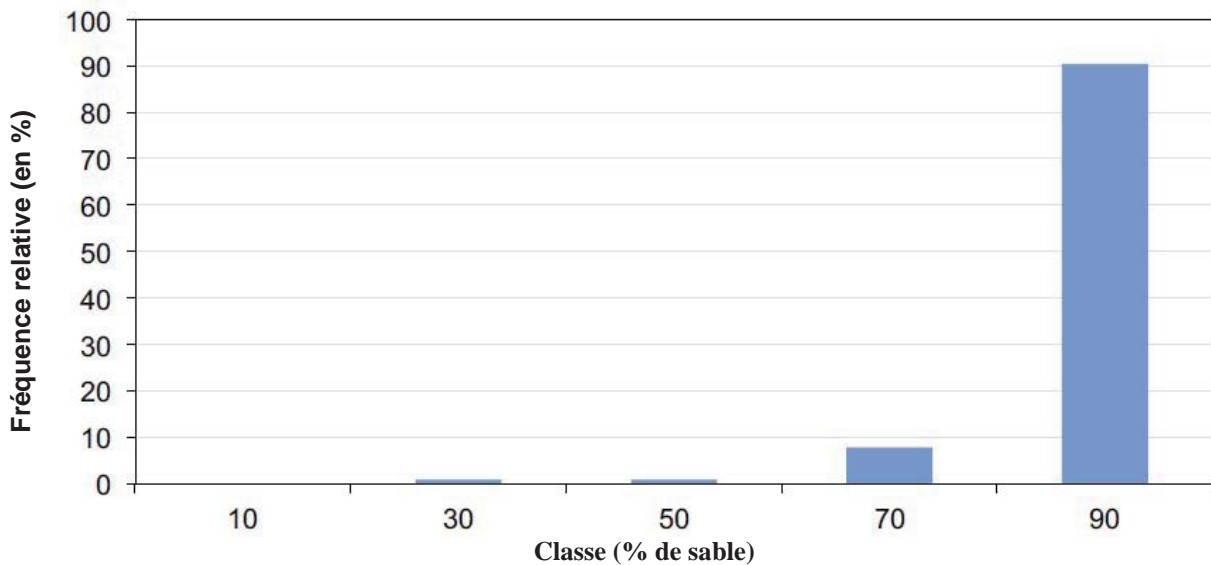
Les intervalles de confiance à 95 % (représentés par des moustaches dans la figure 5) concernant les deux charges annuelles moyennes indiquent l'absence de preuves statistiques d'une différence significative entre les charges en sédiments en suspension avant et après la construction de la route 1856.



**Figure 5.** Charge annuelle moyenne en sédiments en suspension à la hauteur de la station La Trinidad (01-03) – située directement sur le fleuve San Juan – comparée à l'estimation pondérée de la charge respective dans le fleuve San Juan, obtenue à partir des mesures effectuées à hauteur de la station Delta Colorado (11-04) située sur le fleuve Colorado juste après la bifurcation de ces deux cours d'eau. Les moustaches représentent l'intervalle de confiance à 95 % pour les deux moyennes annuelles.

## 2.4. Charge de fond des bassins costa-riens se déversant dans le San Juan

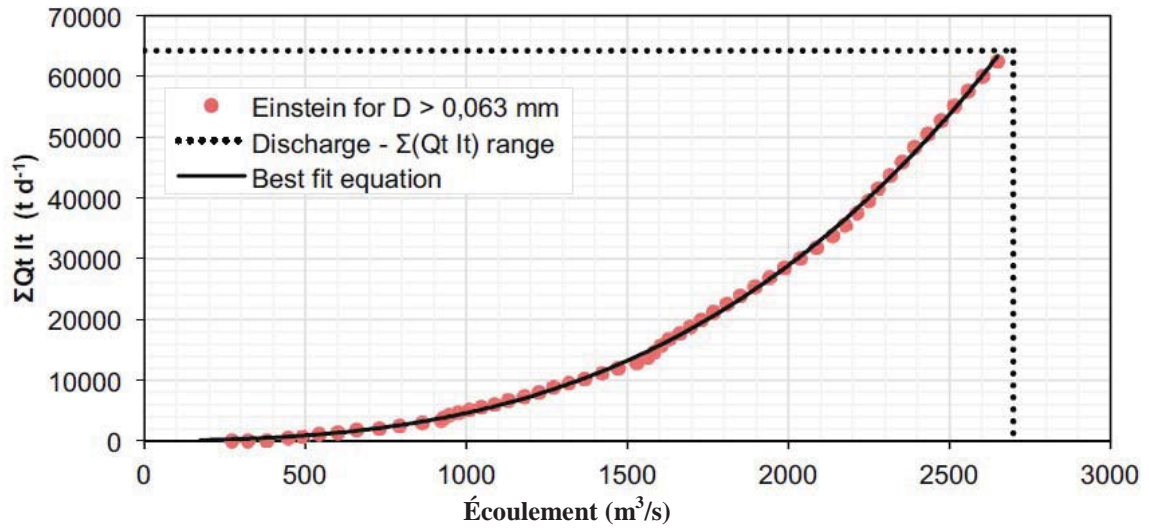
122 échantillons de sédiments du lit ont été prélevés entre décembre 2010 et juin 2013 à différents endroits : les embouchures des fleuves San Carlos et Sarapiquí et la station Delta Colorado (11-04). Tous ces échantillons ont été analysés dans le laboratoire chimique du service d'hydrologie et la répartition correspondante par taille des particules est reprise dans l'appendice E. L'analyse des échantillons démontre que, dans ce système fluvial, la charge de fonds est presque entièrement composée de sable (figure 6). C'est la raison pour laquelle, nous avons eu recours à la fonction d'Einstein pour le calcul du transport des sédiments (Einstein, 1950) afin d'estimer le charriage annuel sur deux sites – le cours inférieur du San Juan et le Colorado – juste après la bifurcation du principal chenal du San Juan. Le détail de ces calculs figure à l'appendice F.



**Figure 6.** Distribution des fréquences du pourcentage en sable de tous les échantillons prélevés sur le lit.

L'application de la fonction d'Einstein aux 115 échantillons prélevés sur le lit du fleuve à la hauteur de la station Delta Colorado (11-04), d'une valeur moyenne  $d_{65}$  de 0,584 mm, ainsi que de la prise en considération des caractéristiques hydrauliques ressortant de la coupe transversale de la station 11-04, a permis de générer une courbe de tarage de la charge de fonds pour toutes les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm (figure 7). Il a ensuite été procédé au calcul du régime sédimentaire du lit (figure 8) sur la base à la fois de la courbe de tarage pertinente et des données hydrographiques relatives à la station 11-04 telles qu'elles sont reprises dans l'appendice C.

Les charriages résultants sont les suivants : 2 488 000 t/an s'écoulant dans le Colorado avec des limites inférieure et supérieure de variabilité de 2 340 000 et 2 595 000 t/an, respectivement. De plus, on estime qu'un charriage de 71 000 t/an s'écoule dans le cours inférieur du San Juan avec des limites inférieure et supérieure de 66 600 et 73 800 t/an, respectivement. Par conséquent, le charriage total dans le chenal principal du San Juan devrait être égal à la somme des charges estimées pour le Colorado et le cours inférieur du San Juan, soit 2 559 000 t/an.



Légende :

- Einstein pour  $D > 0,063$  mm
- Débit - amplitude  $\Sigma(Qt It)$
- Équation la mieux adaptée

Figure 7. Courbe de tarage de la charge de fonds pour les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm à hauteur de la station Delta Colorado (11-04).

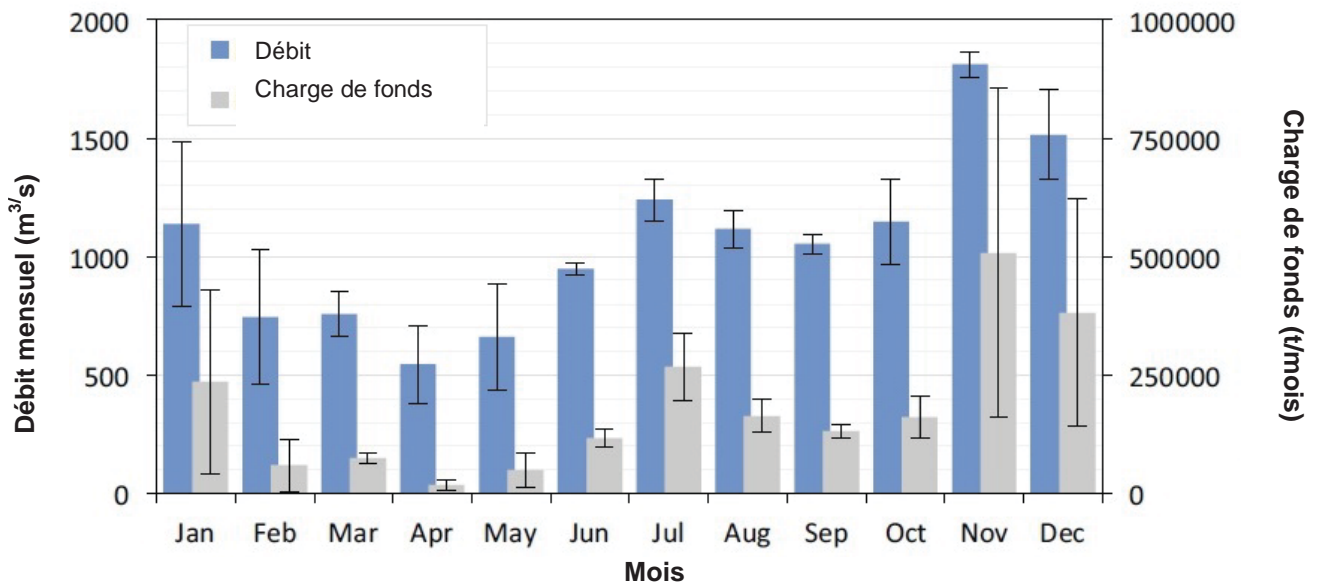
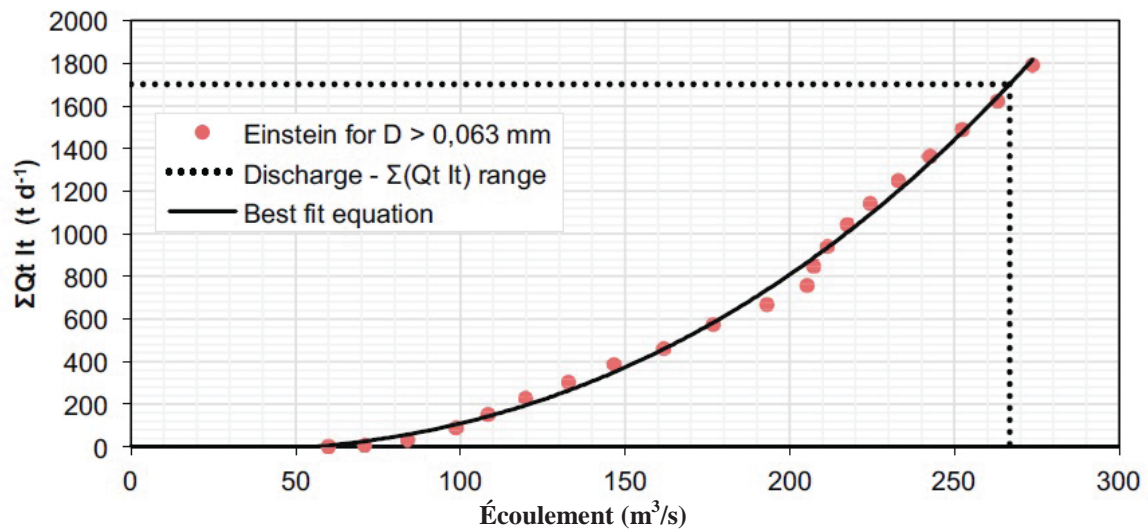


Figure 8. Écoulement et régimes de la charge de fonds : Station 11-04 Delta Colorado (décembre 2010 – juillet 2013).



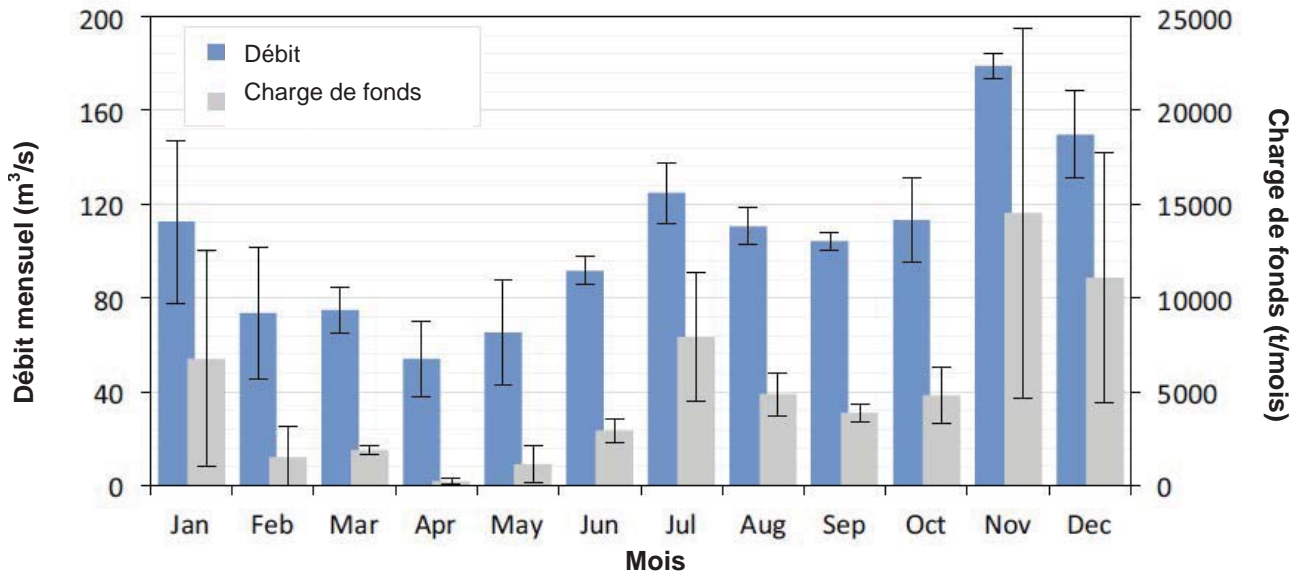
La même méthodologie a été utilisée pour estimer la capacité de charriage du lit concernant les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm dans le cours inférieur du San Juan. Une courbe hydrographique pour cette section du fleuve a été estimée – à partir de données enregistrées à la hauteur de la station Delta Colorado (11-04) – en appliquant un rapport de capacité de débit basé sur la balance de décharge présentée au chapitre 3. De plus, il a été supposé que, juste en aval de la bifurcation, la répartition de la taille des particules demeure analogue dans les sections transversales du Colorado et du cours inférieur du San Juan, ce qui permet l'utilisation dans ce dernier de la même valeur  $d_{65}$  que celle enregistrée à la hauteur de la station Delta Colorado (11-04). Enfin, une valeur de 100 m a été directement extraite d'images satellite récentes et géoréférencée comme largeur représentative du San Juan sur le site pertinent.

La courbe de tarage de la charge de fonds pour toutes les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm a été ensuite générée pour le cours inférieur du San Juan (Fig. 9), puis utilisée pour estimer la charge de fond, telle qu'elle est représentée à la figure 10, avec le débit correspondant. Selon ces calculs, la charge solide sur le lit du cours inférieur du San Juan atteindrait un volume de 71 000 t/an.



**Légende :**  
● Einstein pour  $D > 0,063$  mm  
●●●●● Débit - amplitude  $\Sigma(Qt It)$   
— Équation la mieux adaptée

**Figure 9.** Courbe de tarage de la charge de fonds pour les particules d'une taille supérieure à 0,063 mm. Cours inférieur du San Juan.



**Figure 10.** Écoulement et régimes de la charge de fonds : cours inférieur du San Juan (décembre 2010 - juillet 2013).

### 3. BILAN HYDRAULIQUE DU SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN-COLORADO

Le bilan hydraulique a été calculé pour le système fluvial San Juan - Colorado, en tenant compte de l'apport du lac Nicaragua, ainsi que de tous les principaux affluents qu'ils soient situés au Costa Rica ou au Nicaragua. À cette fin, le débit annuel moyen présenté dans le tableau 1 a été utilisé soit directement (comme c'est le cas pour les données relevées par les trois premières stations de jaugeage situées sur le San Juan), soit à l'issue d'un traitement reposant sur la méthode Zone-Précipitations afin d'estimer l'apport hydraulique des bassins de drainage costa-riciens au San Juan. Les résultats de ce dernier processus sont repris dans le tableau 3 ci-dessous.

**Tableau 3.** Apport hydraulique des bassins fluviaux costa-riciens se déversant dans le fleuve San Juan - Colorado (ICE, 2010)

Bassin	Zone (km <sup>2</sup> )	Moyenne	Débit annuel
		(m <sup>3</sup> /s)	%
Frío	1556	112	14
Pocosol et autres (Medio Queso, etc.)	1256	58	7
Infiernito	561	36	5
San Carlos <sup>a</sup>	2735	209	27
Cureña	328	25	3
Sarapiquí <sup>b</sup>	2762	343	44
Total	9198	783	100

<sup>a</sup> La zone et le débit du bassin du fleuve San Carlos excluent le sous-bassin du lac Arenal.

<sup>b</sup> La zone et le débit du bassin du fleuve Sarapiquí ont été corrigés de manière à tenir compte de la modification du cours du fleuve Sucio, lequel se déverse actuellement dans le bassin du Sarapiquí.

En combinant les informations relatives au débit reprises dans les tableaux 1 et 3, le bilan hydraulique du système fluvial Juan - Colorado a pu être calculé tel qu'il est présenté dans la figure 11. De plus, un résumé des apports du lac Nicaragua, ainsi que des bassins costa-riciens et nicaraguayens, figure dans le tableau 4.

**Tableau 4.** Valeurs des débits (venant des deux côtés de la frontière entre le Costa Rica et le Nicaragua) alimentant le fleuve San Juan – Colorado.

Source	Débit annuel moyen		
	(m <sup>3</sup> /s)	Pourcentage (%)	
		ILN	ELN
Lac Nicaragua	185 <sup>a</sup>	16	-
Bassins costa-riciens	783	70	83
Bassins nicaraguayens	155 <sup>b</sup>	14	17
Total	1123	100	100

*Remarque :* ILN = en incluant le lac Nicaragua ; ELN = en excluant le lac Nicaragua.

<sup>a</sup> Cette valeur a été estimée comme la différence entre le débit du San Juan à la hauteur de la station San Carlos (INETER, 2002) et l'apport du bassin du fleuve Frío (ICE, 2010).

<sup>b</sup> Cette valeur a été estimée comme la différence entre le débit du fleuve San Juan à la hauteur de la station La Trinidad (ICE, 2011) et la somme des apports du lac Nicaragua et de tous les bassins fluviaux costa-riciens.

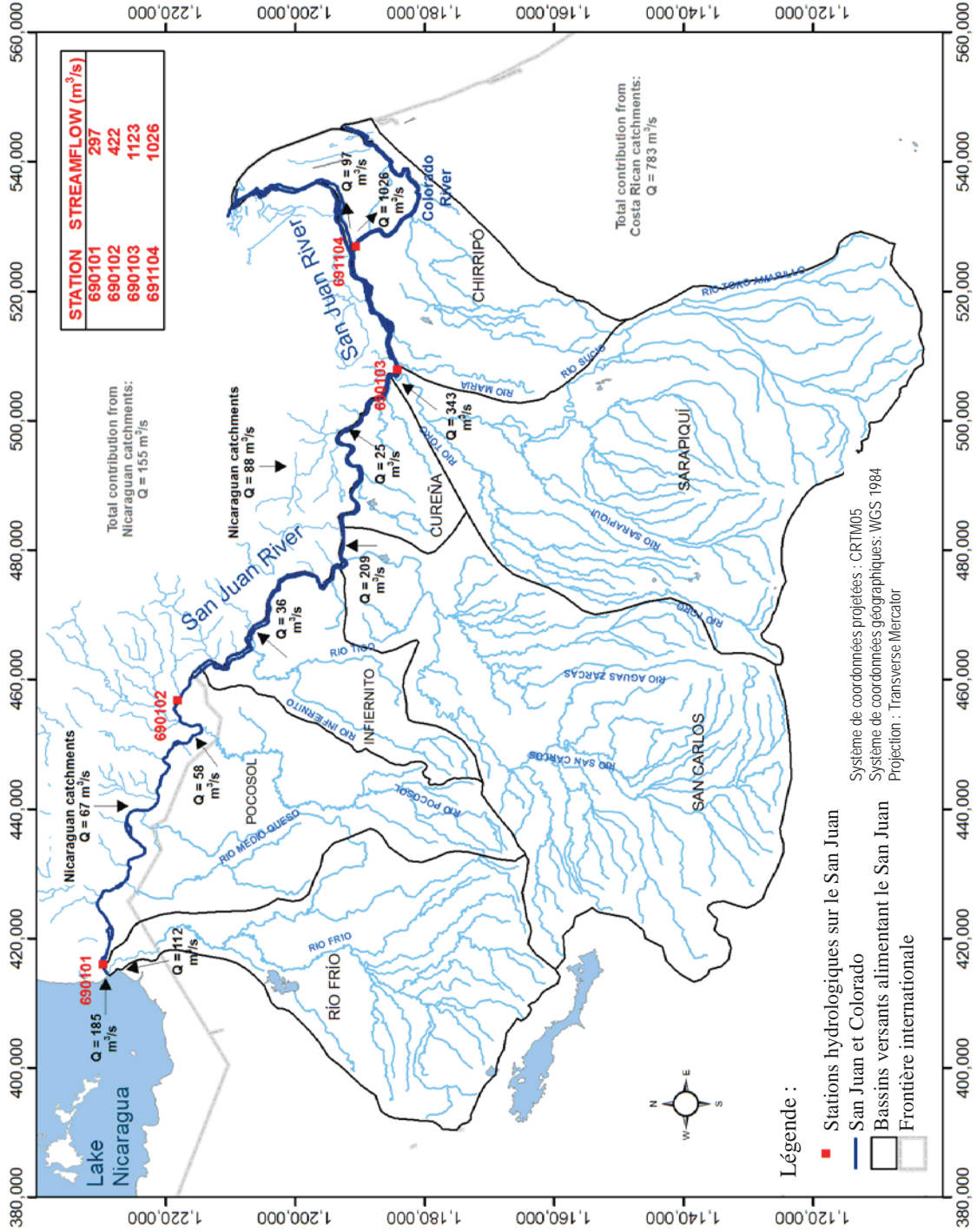


Figure 11. Bilan hydraulique du système fluvial San Juan - Colorado.

#### 4. RÉGIME HYDROLOGIQUE DES BASSINS AFFLUENTS CHARRIANT DES EAUX DU COSTA RICA VERS LE SAN JUAN, AVANT ET APRÈS LA CONSTRUCTION DE LA ROUTE 1856

Afin d'établir le régime hydrologique (sous l'angle du débit) des bassins déversant leurs eaux depuis le Costa Rica dans le San Juan, il était nécessaire d'identifier non seulement les principaux bassins fluviaux, mais également les bassins moins importants alimentant directement ce fleuve. La figure 12 présente le système hydrologique pertinent, lequel est constitué de 7 bassins majeurs et de 80 bassins mineurs (ces derniers étant surlignés en gris). La délimitation des principaux bassins se fonde sur un modèle d'élévation numérique, tandis que – pour les bassins mineurs – on a utilisé le logiciel HydroDem (élaboré par Leblois et Sauquet en 2000) dans le but de corriger manuellement le parcours de l'écoulement dans les régions plates : un problème fréquent en matière de délimitation des petits bassins situés près des rives de cours d'eau naturels ou d'une plaine d'inondation. Une fois tous ces bassins identifiés, une analyse de l'augmentation de la zone imperméable de chaque bassin due à la construction de la route 1856 a été effectuée (voir la section 4.1), de manière à prévoir les régimes hydrologiques antérieurs et postérieurs à la construction de cet ouvrage pour tous les fleuves et cours d'eau se déversant dans le San Juan depuis des bassins costa-riciens (voir la section 4.2).

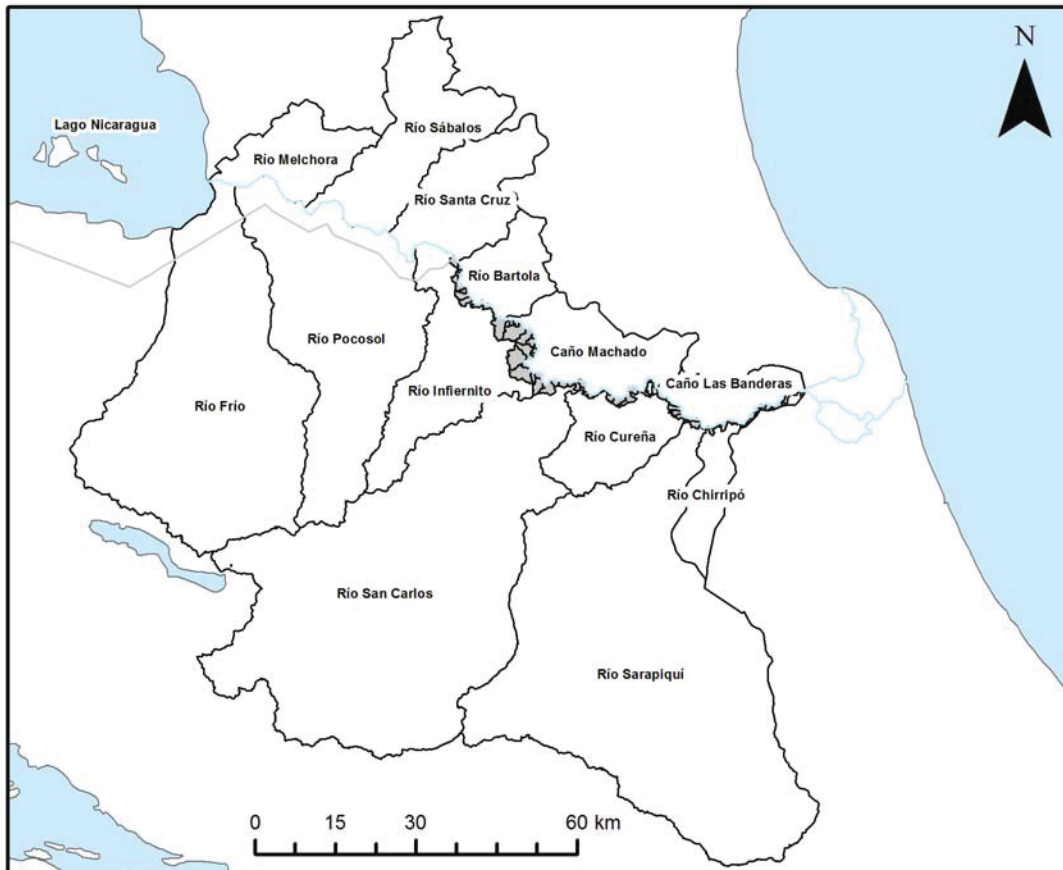


Figure 12. Bassins affluents se déversant dans le San Juan.



#### **4.1. Zone imperméable des bassins se déversant dans le San Juan**

Le tableau 5 indique l'élargissement des zones imperméables consécutif à la construction de la route 1856 (en présumant, au nom de la prudence, que le revêtement de la route est imperméable à 100 %) pour tous les bassins et microbassins se déversant dans le San Juan depuis le Costa Rica (figure 12). Pour ce faire, ladite route a été représentée à l'aide d'un polygone numérique (englobant non seulement le revêtement de la route, mais également tous ses bas-côtés). L'augmentation globale de la zone imperméable pour tous les bassins (majeurs et mineurs) s'élèverait à 0,08% seulement.

**Tableau 5.** Augmentation maximale de la zone imperméable des bassins se déversant dans le San Juan depuis le Costa Rica

Bassin	Zone (km <sup>2</sup> )	Zone imper. (km <sup>2</sup> )	Variation (%)	Bassin	Zone (km <sup>2</sup> )	Zone imper. (km <sup>2</sup> )	Variation (%)
<i>Microbassins entre Mojón II et Delta C.R.</i>				<i>Microbassins entre Mojón II et Delta C.R.</i>			
Bassin 01	2,00	0,109	5,40	Bassin 46	0,88	0,012	1,33
Bassin 02	1,05	0,067	6,40	Bassin 47	0,42	0,005	1,25
Bassin 03	0,41	0,014	3,30	Bassin 48	0,70	0,006	0,80
Bassin 04	1,05	0,047	4,50	Bassin 49	0,39	0,001	0,36
Bassin 05	1,45	0,019	1,30	Bassin 50	1,68	0,030	1,76
Bassin 06	2,20	0,030	1,40	Bassin 51	0,61	0,020	3,33
Bassin 07	0,93	0,006	0,60	Bassin 52	1,57	0,011	0,69
Bassin 08	3,30	0,124	3,70	Bassin 53	0,50	0,007	1,47
Bassin 09	2,68	0,033	1,20	Bassin 54	0,92	0,011	1,20
Bassin 10	0,40	0,021	5,30	Bassin 55	0,56	0,005	0,96
Bassin 11	1,69	0,078	4,60	Bassin 56	4,93	0,080	1,63
Bassin 12	1,12	0,122	10,90	Bassin 57	1,66	0,034	2,08
Bassin 13	0,69	0,097	14,00	Bassin 58	1,60	0,033	2,07
Bassin 14	0,61	0,073	12,10	Bassin 59	1,16	0,037	3,16
Bassin 15	8,12	0,117	1,40	Bassin 60	1,47	0,028	1,88
Bassin 16	1,01	0,025	2,40	Bassin 61	1,70	0,092	5,42
Bassin 17	0,83	0,025	3,00	Bassin 62	0,76	0,029	3,78
Bassin 18	1,08	0,067	6,20	Bassin 63	0,40	0,013	3,26
Bassin 19	9,77	0,081	0,80	Bassin 64	3,53	0,035	0,98
Bassin 20	0,68	0,076	11,30	Bassin 65	2,83	0,093	3,29
Bassin 21	5,24	0,055	1,00	Bassin 66	2,43	0,051	2,10
Bassin 22	0,68	0,050	7,40	Bassin 67	0,38	0,016	4,34
Bassin 23	2,09	0,052	2,50	Bassin 68	1,26	0,067	5,31
Bassin 24	0,86	0,009	1,00	Bassin 69	0,68	0,029	4,24
Bassin 25	0,63	0,010	1,60	Bassin 70	1,49	0,004	0,30
Bassin 26	5,50	0,018	0,30	Bassin 71	1,58	0,055	3,47
Bassin 27	10,27	0,006	0,10	Bassin 72	1,48	0,064	4,32
Bassin 28	0,91	0,040	4,40	Bassin 73	2,08	0,016	0,77
Bassin 29	9,12	0,035	0,40	Bassin 74	1,62	0,006	0,35
Bassin 30	1,65	0,109	6,60	Bassin 75	2,63	0,100	3,80
Bassin 31	4,37	0,040	0,90	Bassin 76	0,40	0,006	1,56
Bassin 32	1,49	0,017	1,20	Bassin 77	2,21	0,005	0,23
Bassin 33	0,56	0,005	0,87	Bassin 78	0,58	0,003	0,47
Bassin 34	0,87	0,033	3,84	Bassin 79	0,69	0,040	5,74
Bassin 35	0,76	0,036	4,70	Bassin 80	1,32	0,025	1,91
Bassin 36	0,44	0,028	6,35	<i>Principaux bassins costa-riens le long du fleuve San Juan</i>			
Bassin 37	1,71	0,063	3,70	Fleuve Frío	1 746	0,00	0,00
Bassin 38	1,14	0,039	3,45	Fleuve Pocosol	1 224	0,93	0,08
Bassin 39	1,07	0,031	2,92	Fleuve Infiernito	609	1,99	0,33
Bassin 40	0,71	0,041	5,72	Fleuve San Carlos	2 644	0,34	0,01
Bassin 41	1,88	0,051	2,73	Fleuve Cureña	343	0,76	0,22
Bassin 42	0,97	0,020	2,03	Fleuve Sarapiquí	2 743	0,06	0,00
Bassin 43	0,51	0,034	6,63	Fleuve Chirripó	255	0,41	0,16
Bassin 44	1,15	0,009	0,77	Résumé			
Bassin 45	0,40	0,003	0,74	Total	9 564	4,50	0,05

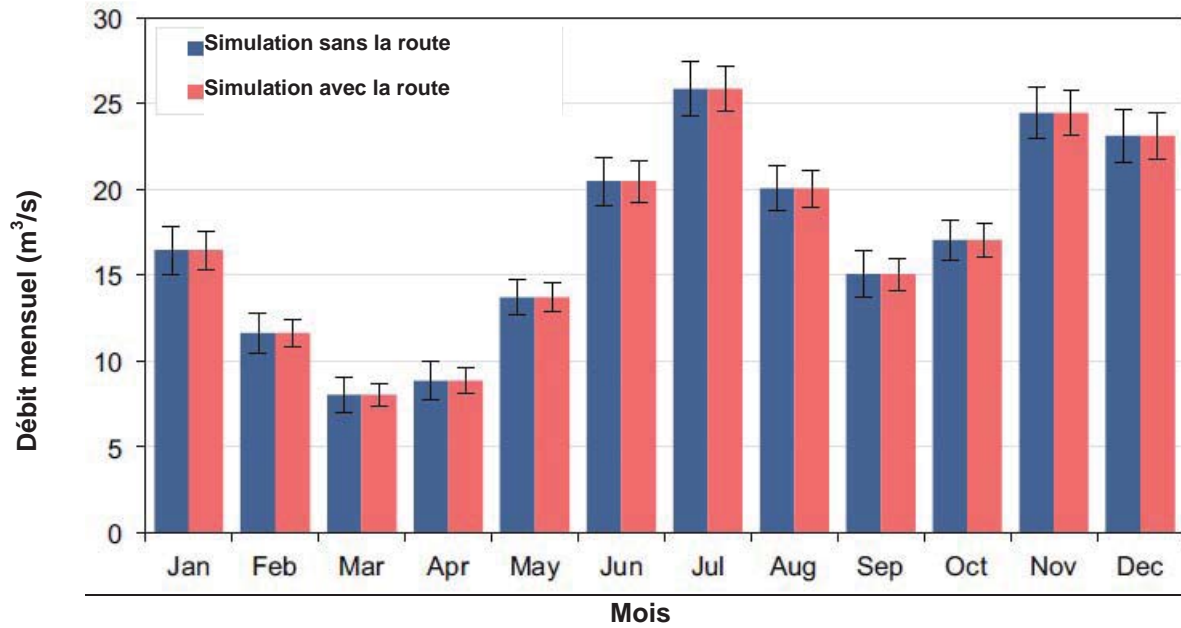
#### 4.2. Régime hydrologique de tous les fleuves et cours d'eau se déversant dans le San Juan depuis des bassins costa-riciens : évaluation de la route 1856

Des hydrogrammes synthétiques ont été générés pour la période 1976-2013 sur la base des séries de données journalières relatives aux précipitations relevées par la station El Bum (69-578) à l'aide du modèle HEC-HMS (élaboré par le corps du génie de l'armée des États-Unis d'Amérique), du modèle décrivant les relations entre le ruissellement et les précipitations basé sur des numéros de courbe et mis au point par le service de conservation des sols (SCS), ainsi que de l'hydrogramme unitaire proposé par le même organisme. Les numéros de courbe ont été estimés pour les conditions prévalant avant et après la construction de la route 1856 en se référant à des cartes d'utilisation des sols fournies par l'ICE et Andreas Mende, ainsi qu'aux tables de référence proposées par Hawkins *et al.* (2009) comme une moyenne pondérée par zone pour chaque bassin ; les conditions antérieures d'humidité – dites « ACM II » et correspondant aux paramètres moyens – ont été sélectionnées. Pour chaque microbassin, les abstractions initiales (Ia) et le temps de concentration (tc) ont été calculés sur la base du CN et des paramètres morphométriques (zone, pente moyenne, longueur du parcours de l'écoulement le plus long, etc.) ; le temps de réponse (tg) supposé est de 0,6 tc, en vertu de l'équation utilisée à cette fin par le SCS.

Pour pouvoir quantifier les impacts hydrologiques de la construction de la route 1856, des régimes de débit ont été calculés pour le système de microbassins situé, au Costa Rica, entre Mojón II et Delta, sur la base des séries de données de précipitation journalières recueillies depuis 38 ans par la station El Bum (69-578). Deux modèles hydrologiques ont été construits de manière à permettre une simulation de la réaction du système au ruissellement, en présence ou en l'absence de la route 1856. Le tableau 6 et la figure 13 présentent les résultats de ces simulations et illustrent l'impact auquel on peut s'attendre, en raison de la construction de la route, sous l'angle du régime du débit mensuel.

**Tableau 6.** Régime du débit pour les microbassins se déversant dans le San Juan, sur la base d'une modélisation HEC-HMS entre 1976 ou 2013, en distinguant entre une configuration avec ou sans la route 1856.

Mois	Débit sans la route (m <sup>3</sup> /s)		Débit avec la route (m <sup>3</sup> /s)		
	Valeur moyenne	Borne d'erreur	Valeur moyenne	Borne d'erreur	Différence (m <sup>3</sup> /s)
Janvier	16,46	1,13	16,47	1,42	3,81 X 10 <sup>-3</sup>
Février	11,63	0,81	11,63	1,20	6,39 X 10 <sup>-4</sup>
Mars	8,06	0,64	8,06	1,01	1,45 X 10 <sup>-4</sup>
Avril	8,87	0,76	8,87	1,16	1,03 X 10 <sup>-4</sup>
Mai	13,70	0,86	13,70	1,01	1,38 X 10 <sup>-4</sup>
Juin	20,46	1,23	20,46	1,43	1,37 X 10 <sup>-4</sup>
Juillet	25,84	1,31	25,84	1,59	1,69 X 10 <sup>-4</sup>
Août	20,05	1,10	20,05	1,33	5,51 X 10 <sup>-5</sup>
Septembre	15,04	0,90	15,04	1,35	3,76 X 10 <sup>-5</sup>
Octobre	17,05	1,02	17,05	1,20	2,72 X 10 <sup>-5</sup>
Novembre	24,45	1,32	24,45	1,46	2,76 X 10 <sup>-5</sup>
Décembre	23,09	1,35	23,09	1,54	1,50 X 10 <sup>-5</sup>

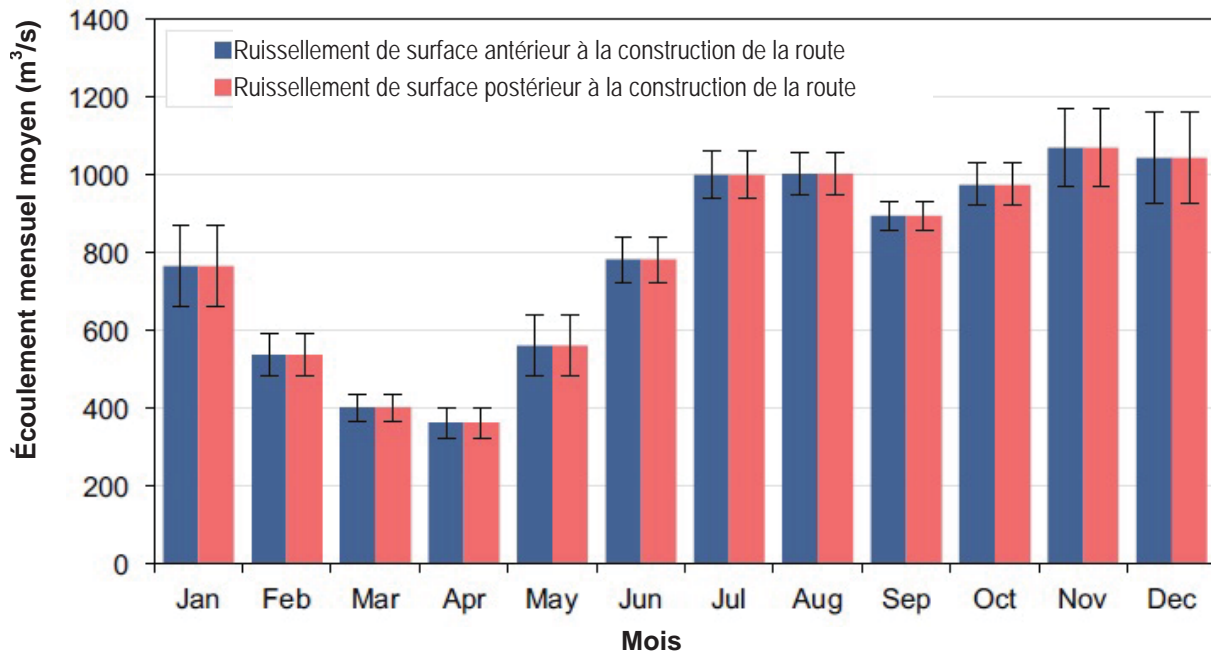


**Figure 13.** Régime de débit des microbassins se déversant dans le San Juan, modélisation HEC-HMS pour la période allant de 1976 à 2013, dans des configurations incluant et excluant la route 1856.

Dans le but d'estimer le régime hydrologique des bassins costa-riciens majeurs le long du San Juan avant la construction de la route, nous avons étudié les séries de données mensuelles relatives au débit enregistrées par quatre stations, pour la période 1971-2006 : Guatuso (16-02) située dans le bassin du fleuve Frio, Terrón Colorado (14-04) située dans le bassin du fleuve San Carlos et, enfin, Viejo (12-03) et Veracruz (12-04) situées toutes deux dans le bassin du fleuve Sarapiquí. Le régime de l'ensemble du système a été calculé sur la base des régimes individuels de ces quatre bassins versants, puis corrigé à l'aide de la méthode Zone-Précipitations et d'un facteur déduit du bilan hydraulique tel qu'il est présenté au chapitre 3. Le régime hydrologique des bassins costa-riciens majeurs situés le long du San Juan, dans des conditions correspondant à la période suivant la construction de la route 1856, a été calculé en ajoutant les différences absolues dans le débit (telles qu'elles ont été estimées pour le système de microbassins) au régime antérieur à la route ayant fait l'objet d'une estimation préalable. Les résultats apparaissent dans le tableau 7 et la figure 14.

**Tableau 7.** Régime de débit pour l'ensemble des bassins (micro et macro) se déversant dans le San Juan. Séries chronologiques générées entre 1971 et 2006 pour des conditions antérieures et postérieures à la construction de la route 1856.

Mois	Débit sans la route (m³/s)			Différence absolue (m³/s)	Différence relative (%)
	préRoute	postRoute	Borne d'erreur		
Janvier	765,30	765,44	103,7	$3,81 \times 10^{-3}$	$4,97 \times 10^{-4}$
Février	535,56	535,59	54,8	$6,39 \times 10^{-4}$	$4,97 \times 10^{-4}$
Mars	400,64	400,64	34,9	$1,45 \times 10^{-4}$	$1,19 \times 10^{-4}$
Avril	360,78	360,79	40,2	$1,03 \times 10^{-4}$	$3,62 \times 10^{-5}$
Mai	561,09	561,09	76,8	$1,38 \times 10^{-4}$	$2,86 \times 10^{-5}$
Juin	781,79	781,80	59,2	$1,37 \times 10^{-4}$	$1,75 \times 10^{-5}$
Juillet	1000,46	1000,47	60,5	$1,69 \times 10^{-4}$	$1,69 \times 10^{-5}$
Août	1001,94	1001,94	53,0	$5,51 \times 10^{-5}$	$5,50 \times 10^{-6}$
Septembre	894,23	894,23	35,9	$3,76 \times 10^{-5}$	$4,21 \times 10^{-6}$
Octobre	974,93	974,93	54,3	$2,72 \times 10^{-5}$	$2,79 \times 10^{-6}$
Novembre	1069,41	1069,41	100,4	$2,76 \times 10^{-5}$	$2,58 \times 10^{-6}$
Décembre	1043,77	1043,78	118,6	$1,50 \times 10^{-5}$	$1,44 \times 10^{-6}$



**Figure 14.** Régime hydrologique pour l'ensemble des bassins (micro et macro) se déversant dans le San Juan. Séries chronologiques générées entre 1971 et 2006 pour des conditions antérieures et postérieures à la construction de la route 1856.

### 5. EROSION DISTRIBUÉE ET APPORT SOLIDE DANS LE SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN - COLORADO

L'érosion du sol, l'apport solide et le ratio potentiel de production des sédiments des bassins majeurs se déversant directement dans le San Juan – soit depuis le Costa Rica (Frío, Pocosol, Infiernito, San Carlos, Cureña, Sarapiquí et Chirripó), soit depuis le Nicaragua (Melchora, Sábalos, Santa Cruz, Bartola, Caño Machado et Caño Las Banderas) – ont été estimés à l'aide du modèle CALSITE (Bradbury *et al.*, 1993). CALSITE (acronyme de l'anglais *Calibrated Simulation of Transported Erosion*) est un logiciel reprenant l'équation USLE (acronyme de l'anglais *Universal Soil Loss Equation* pouvant être traduit par «équation universelle de perte de sol») (Wischmeier et Smith, 1960) :

$$A = R K L S C P \quad (1)$$

où  $R$  = facteur d'effet érosif des pluies,  $K$  = facteur d'érodabilité du sol,  $L S$  = facteur topographique et  $C P$  = facteur d'utilisation et de gestion des terres,

pour prévoir l'érosion du sol dans un bassin, ainsi que le volume estimé du matériau transporté tel qu'il contribue à l'apport solide généré par ledit bassin. CALSITE a recours à des techniques empruntées au système d'information géographique (SIG) pour cartographier et montrer l'érosion du sol, de même que les sources de l'apport solide généré par des rigoles et des griffes au sein d'un bassin (voir la section H.1. dans l'appendice H). Ce logiciel est conçu comme un outil de gestion et de planification de bassin permettant d'identifier les sources actuelles d'érosion et d'apport solide et de prévoir les effets des changements dans la gestion des terres sur l'érosion et la sédimentation. Le travail avec CALSITE se décompose en trois étapes : *a*) le calcul de l'érosion (potentielle) totale du sol ; *b*) le calibrage de la fonction d'apport solide sur la base soit de la mesure de la charge solide observée, soit d'une fonction prédéfinie d'apport solide ; et *c*) le calcul et la cartographie du transport des sédiments érodés ou de l'apport solide.



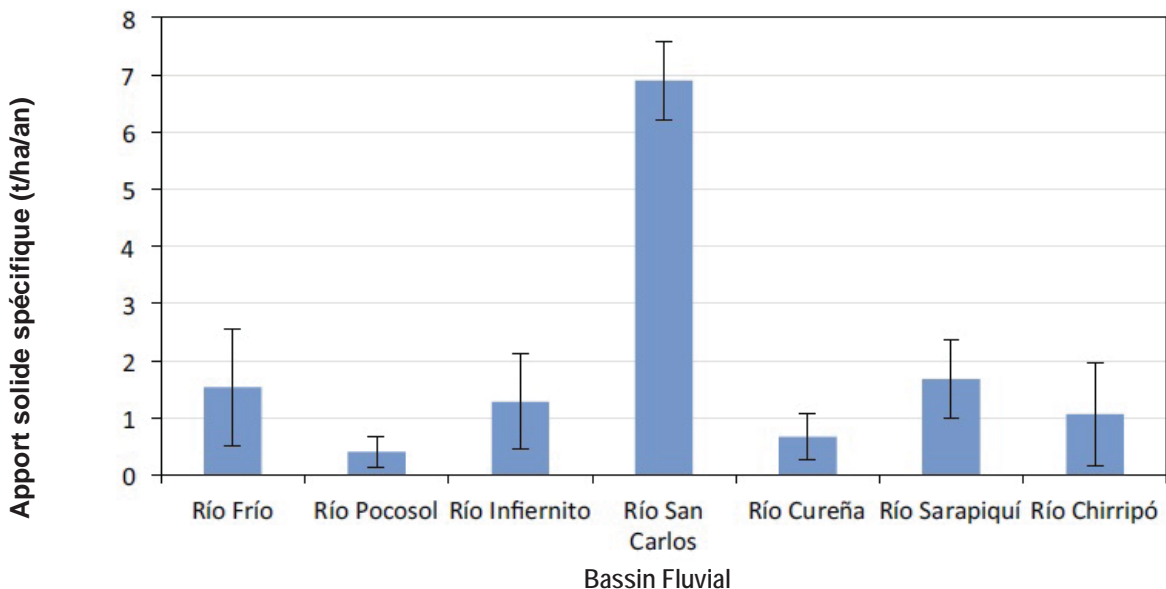
ALSITE utilisant une approche SIG, il était nécessaire d'obtenir des informations cartographiées sur les précipitations, l'utilisation des terres, les sols, la topographie et les pratiques agricoles. Des cartes numériques relatives à l'action érosive des précipitations, au niveau moyen des précipitations annuelles, à l'utilisation et à la gestion des sols et à l'érodabilité du sol, ainsi que des modèles numériques d'élévation et de pente, ont été générées pour les bassins majeurs costa-riciens et nicaraguayens se déversant directement dans le San Juan. La section H.2 de l'appendice H reproduit les cartes numériques d'entrée et de sortie générées à cette fin. Deux fonctions différentes d'apport solide ont été calibrées sur la base des données relatives aux sédiments communiquées par les stations de jaugeage hydrologique réparties dans les bassins du San Carlos et du Sarapiquí. Une fonction d'apport moyen a ensuite été calculée et appliquée pour estimer l'apport solide fourni par les bassins costa-riciens et nicaraguayens majeurs se déversant dans le San Juan.

Les résultats relatifs aux bassins costa-riciens sont repris dans le tableau 8, ainsi que dans les figures 15, 16 et 17. Les moustaches dans les graphiques suivants indiquent systématiquement la zone de confiance à 95 %.

**Tableau 8.** Apports solides estimés des bassins costa-riciens

Bassin	RD	EPS (t/ha/an)	CSP (t/an)	ASS (t/ha/an)	AS (t/an)
<i>Bassins costa-riciens majeurs se déversant directement dans le San Juan</i>					
Fleuve Frío	0,39	3,96	691 000	1,54	269 000
Fleuve Pocosal	0,20	2,01	246 000	0,40	49 000
Fleuve Infiernito	0,38	3,35	204 000	1,28	78 000
Fleuve San Carlos	0,56	12,38	3 273 000	6,90	1 824 000
Fleuve Cureña	0,41	1,65	57 000	0,67	23 000
Fleuve Sarapiquí	0,11	15,68	4 301 000	1,67	458 000
Fleuve Chirripó	0,24	4,43	113 000	1,07	27 000
<i>Résumé pour l'ensemble de la zone costa-ricienne se déversant directement dans le San Juan</i>					
Total	0,31	9,29	8 885 000	2,85	2 728 000

Remarque : RD = ratio de débit ; EPS = érosion potentielle spécifique ; CSP = charge solide potentielle ; ASS = apport solide spécifique ; AS = apport solide SY.



**Figure 15.** Apports solides spécifiques des bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan.

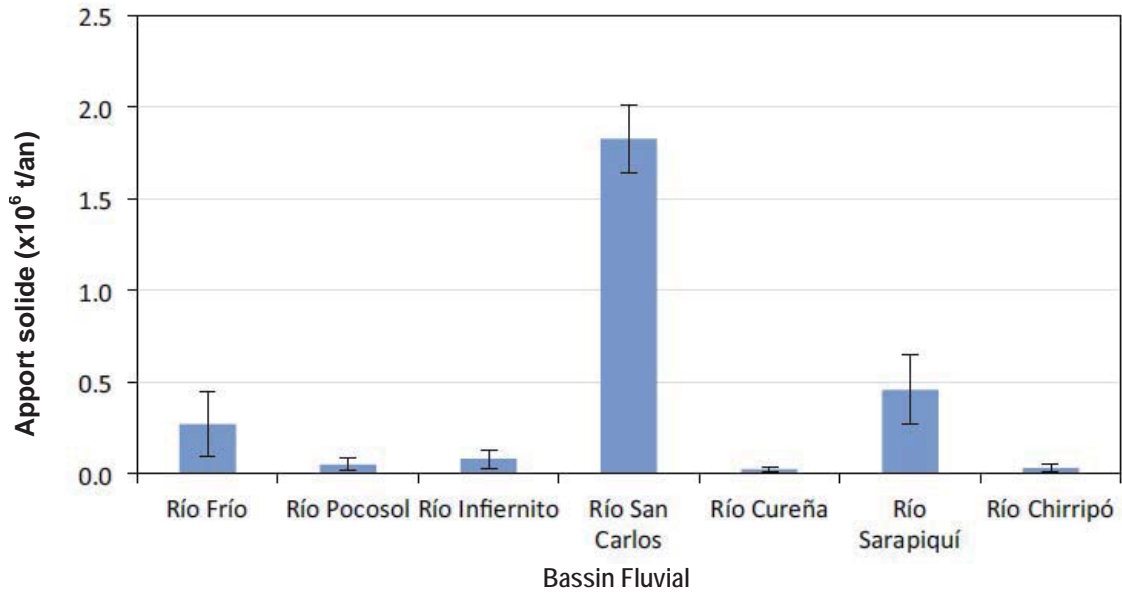


Figure 16. Total des apports solides des bassins costariciens se déversant dans le San Juan.

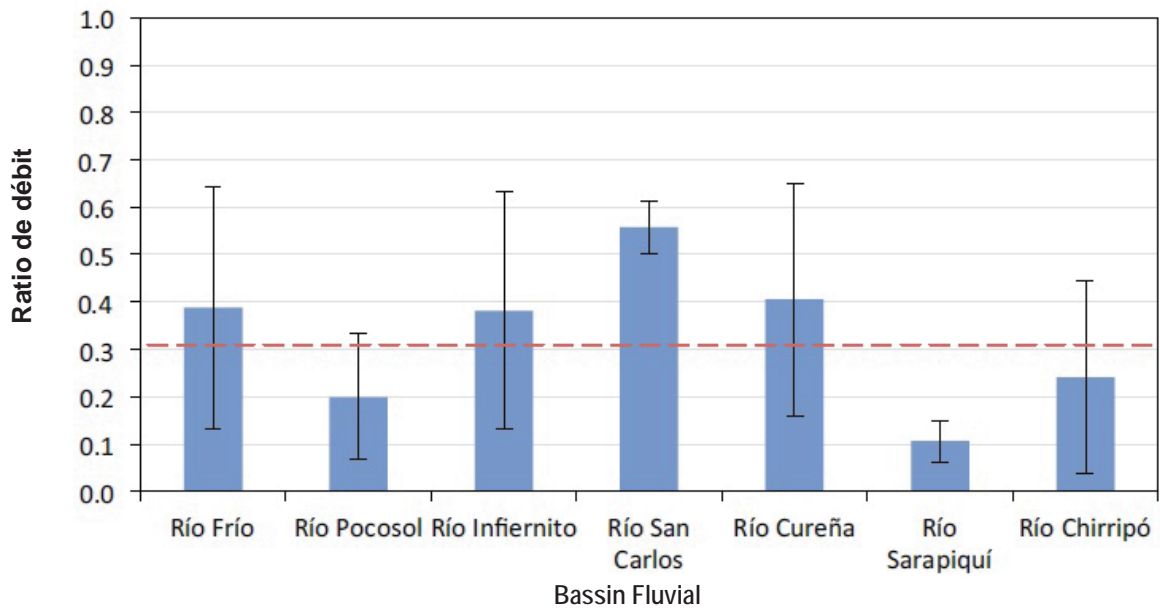


Figure 17. Ratios de production des sédiments des bassins costariciens se déversant dans le San Juan. La ligne en pointillés représente la valeur moyenne pour l'ensemble du système de drainage (laquelle est égale à 0,31).

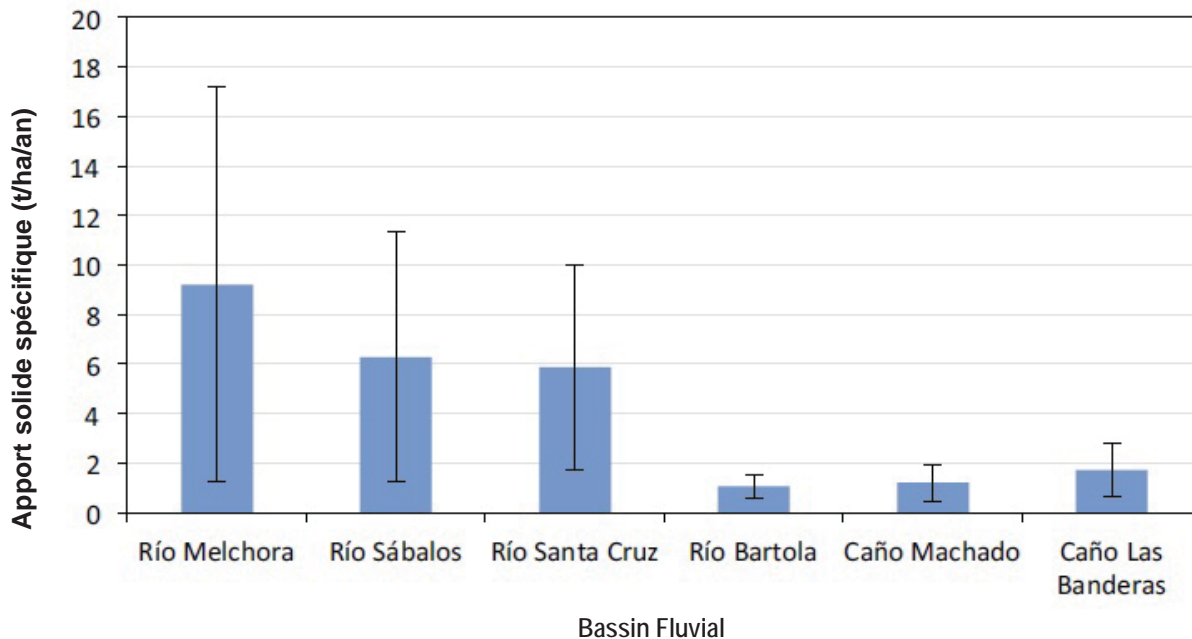
Comme indiqué plus haut, les apports solides générés par les systèmes fluviaux nicaraguayens ont été estimés en recourant à la fonction de calcul de débit moyen calibrée sur la base des données en provenance des bassins du San Carlos et du Sarapiquí. Les résultats sont présentés dans le tableau 9, ainsi que dans les figures 18, 19 et 20.

**Tableau 9.** Apports solides estimés pour les bassins nicaraguayens.

Bassin	RD	EPS (t/ha/an)	CSP (t/an)	ASS (t/ha/an)	AS (t/an)
<i>Bassins fluviaux majeurs du Nicaragua se déversant directement dans le San Juan</i>					
Melchora	0,24	39,05	1 170 000	9,22	278 000
Sábalos	0,28	22,47	1 312 000	6,27	366 000
Santa Cruz	0,35	16,66	691 000	5,88	244 000
Bartola	0,58	1,84	40 000	1,07	23 000
Machado Creek	0,35	3,44	124 000	1,21	44 000
LasBanderas	0,35	4,87	88 000	1,72	31 000
<i>Résumé pour l'ensemble de la zone nicaraguayenne se déversant directement dans le San Juan</i>					
Total	0,29	16,65	3 432 000	4,78	986 000

Remarque : RD = ratio de débit ; EPS = érosion potentielle spécifique ; CSP = charge solide potentielle ; ASS = apport solide spécifique ; AS = apport solide.

Il convient de relever que, même si l'érosion potentielle et les apports solides des bassins costa-riciens sont supérieurs à ceux du Nicaragua (en raison de la taille beaucoup plus grande de la zone de drainage du côté du Costa Rica), l'érosion potentielle et l'apport solide spécifiques (à savoir l'érosion et l'apport solide par unité de surface) sont beaucoup plus importants du côté du Nicaragua (comme cela ressort d'une comparaison de la figure 15 et de la figure 18). Cette constatation indique que les bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan produisent beaucoup plus de sédiments par unité de surface que les bassins costa-riciens.



**Figure 18.** Apport solides spécifiques pour les bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan.

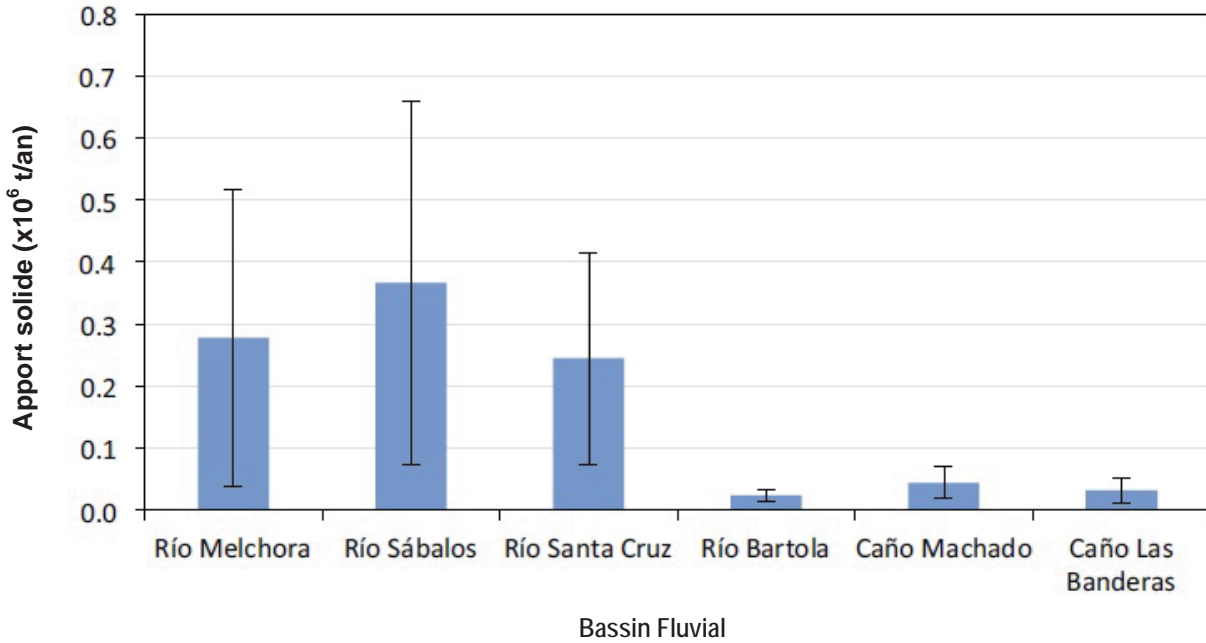


Figure 19. Total des apports solides des bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan.

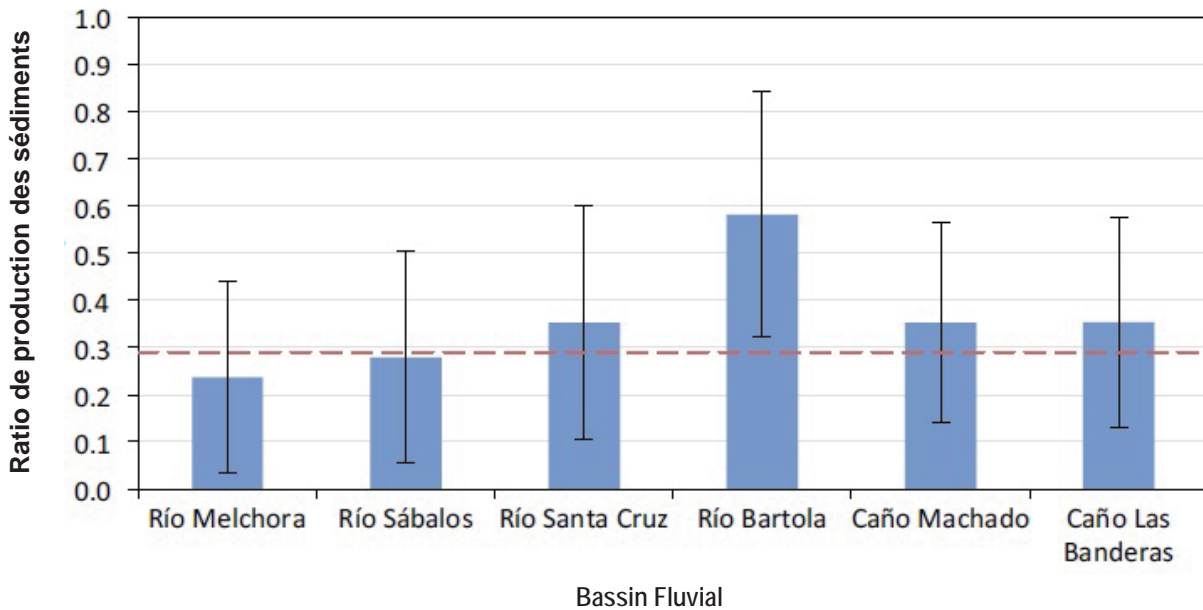


Figure 20. Ratios de production des sédiments pour les bassins nicaraguayens se déversant dans le San Juan. La ligne en pointillés représente la valeur moyenne de l'ensemble du système de drainage (laquelle est égale à 0,29).

## 6. BILAN SÉDIMENTAIRE DU SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN - COLORADO, AVANT ET APRÈS LA CONSTRUCTION DE LA ROUTE 1856

Après avoir estimé à l'aide d'une modélisation (comme indiqué dans la section précédente) tous les apports de sédiments en suspension (SS) entrant dans le San Juan depuis les bassins costa-ricains et nicaraguayens, il devient possible de calculer le bilan sédimentaire, à condition de connaître la charge solide dans le fleuve juste en amont de la bifurcation à la hauteur de Delta Colorado. Il convient de noter que cette station (11-04) constitue la source la plus importante et la plus fiable d'estimation de la charge solide aux fins d'établissement dudit bilan (dans la mesure où elle intègre tous les apports de sédiments entrant dans le système du San Juan et où les mesures ont

été effectuées directement par l'ICE). Il convient de noter, en outre, que les mesures de la charge solide par la même station 11-04 – utilisées pour estimer la charge – ont été effectuées après la construction de la route 1856. Il s'ensuit que le bilan sédimentaire établi sur la base de ces mesures représente nécessairement les conditions hydrologiques et sédimentologiques qui prévalent depuis la construction de la route 1856. Par conséquent, à l'issue d'une estimation de la contribution supplémentaire à l'apport solide due à la construction de la route 1856 dans la section 6.2, un deuxième bilan sédimentaire a été obtenu en soustrayant ladite contribution, de manière à obtenir le bilan initial (correspondant à l'état du système fluvial avant la route).

### **6.1. Total de la charge solide annuelle après la construction de la route 1856**

Sur la base des mesures effectuées par la station Delta Colorado (11-04) et à supposer que les concentrations de sédiment soient homogènes, il a été calculé dans la section 2.3.3 que la charge de sédiments en suspension juste en amont est de 6 573 000 t/an dans le San Juan et de 5 981 000 t/an dans le Colorado, ce qui implique que 592 000 t/an (soit la différence entre ces deux charges) passent dans le cours inférieur du San Juan. Dans la section 2.4, les charges de fonds du Colorado et du cours inférieur du San Juan avaient été estimées à 2 488 000 et 71 000 t/an, respectivement. Si l'on ajoute ces deux chiffres, la charge de fonds du San Juan juste en amont de Delta Colorado peut être estimée à 2 559 000 t/an. Sur la base de ces chiffres, la charge solide totale (à savoir les sédiments en suspension plus la charge de fonds) du San Juan serait de 9 133 000 t/an et répartie comme suit au niveau de Delta Colorado : 8 470 000 t/an passent dans le Colorado et 663 000 t/an dans le cours inférieur du San Juan lui-même.

La charge en suspension du San Juan est deux fois et demie plus importante que la charge de fonds. En vue d'estimer la contribution de la charge de fonds de chacun des bassins majeurs (sept au Costa Rica et six au Nicaragua) se déversant dans le San Juan et considérant que, pour tous ces bassins, les charges de sédiments en suspension ont déjà été déterminées (voir le chapitre 5), la charge de fonds de chaque bassin a été estimée à 40 % de la charge des sédiments en suspension. De plus, il a été supposé que le lac Nicaragua se comporte comme un énorme piège à sédiments retenant les matériaux grossiers et, par conséquent, ne fournit pas de matériaux de fonds au San Juan.

Un résumé des charges solides (en suspension, de fonds et totale) – calculées pour chacun des bassins majeurs se déversant depuis le Costa Rica ou le Nicaragua dans le San Juan – figure dans le tableau 10.



**Tableau 10. Charge solide annuelle (incluant les sédiments en suspension et la charge de fonds) produite par le lac Nicaragua et les bassins se déversant dans le San Juan**

Bassin	Charge des sédiments en suspension (t/an)	Matériaux de fonds (t/an)	Total de la charge solide (t/an)
<i>Bassins fluviaux majeurs du Costa Rica se déversant directement dans le San Juan</i>			
Frío	269 000	108 000	377 000
Pocosol	49 000	20 000	69 000
Infiernito	78 000	31 000	109 000
San Carlos	1 824 000	730 000	2 554 000
Cureña	23 000	9 000	32 000
Sarapiquí	458 000	183 000	641 000
Chirripó	27 000	11 000	38 000
<i>Bassins fluviaux majeurs du Nicaragua (y compris le lac Nicaragua) se déversant directement dans le San Juan</i>			
Melchora	278 000	111 000	389 000
Sábalos	366 000	146 000	512 000
Santa Cruz	244 000	98 000	342 000
Bartola	23 000	9 000	32 000
Machado	44 000	17 000	61 000
Las Banderas	31 000	12 000	43 000
Lac Nicaragua	365 000	-	365 000
<i>Résumé pour l'ensemble du système fluvial San Juan - Colorado</i>			
<b>Total</b>	4 079 000	1 485 000	5 566 000

La raison pour laquelle l'apport solide total indiqué dans le tableau 10 (5 566 000 t/an) est inférieur à la charge totale mesurée dans le San Juan (9 133 000 t/an) tient à ce que le modèle CALSITE (Bradbury *et al.*, 1993) servant à déterminer la charge en sédiments en suspension produite par les bassins se déversant dans le fleuve, ne correspond qu'à une érosion en rigoles et en griffes et ne concerne pas l'apport solide inhérent à des processus d'érosion à plus grande échelle (comme le ravinement et les glissements de terrain). L'application du modèle CALSITE à la gestion de multiples plans opérationnels d'hydroélectricité et de gestion des bassins hydrographiques (Gómez-Delgado, 2002 et 2004 ; Gómez-Delgado *et al.*, 2011 ; Marchamalo *et al.*, 2007 et 2012) démontre sa cohérence et sa fiabilité en matière d'évaluation du composant *érosion en rigoles/griffes* par rapport au total de l'apport solide transporté. Cependant, ces multiples applications ont également prouvé l'existence d'un composant n'étant pas lié à ladite érosion dans tous les bassins tropicaux, composant dont il faut tenir compte pour avancer une estimation réaliste du bilan sédimentaire. Dans ce contexte, selon Poesen *et al.* (2003), les ravines et les glissements de terrain pourraient représenter une part comprise entre 10 et 94 % de l'érosion totale dans les bassins fluviaux.

Dans ce cas particulier, la différence entre le montant total de la charge solide mesurée dans le fleuve San Juan et l'apport solide produit par la modélisation de l'érosion par rigoles et griffes de tous les bassins (soit 3 567 000 t/an) peut être attribuée à des processus de ravinement et de glissement de terrain, de sorte que cet apport solide a été redistribué en proportion de la charge totale indiquée pour l'ensemble des bassins se déversant dans le fleuve, ainsi que pour le lac Nicaragua. Le total (corrigé) de la charge solide annuelle par bassin est indiqué dans le tableau 11.

**Tableau 11.** Charges annuelles corrigées pour le lac Nicaragua et le système de bassins se déversant dans le San Juan.

Bassin	Charge des sédiments en suspension (t/an)	Matériaux de fonds (t/an)	Total de la charge de sédiments (t/an)
<i>Bassins fluviaux majeurs du Costa Rica se déversant directement dans le San Juan</i>			
Frío	433 000	185 000	618 000
Pocosol	79 000	34 000	113 000
Infiernito	126 000	54 000	180 000
San Carlos	2 939 000	1 257 000	4 196 000
Cureña	37 000	16 000	53 000
Sarapiquí	738 000	316 000	1 054 000
Chirripó	44 000	19 000	63 000
<i>Bassins fluviaux majeurs du Nicaragua (y compris le lac Nicaragua) se déversant directement dans le San Juan</i>			
Melchora	448 000	192 000	640 000
Sábalos	590 000	252 000	842 000
Santa Cruz	393 000	168 000	561 000
Bartola	37 000	16 000	53 000
Machado	71 000	30 000	101 000
Las Banderas	50 000	21 000	71 000
Lac Nicaragua	588 000	-	588 000
<i>Résumé pour l'ensemble du système fluvial San Juan - Colorado</i>			
Colorado	5 981 000	2 489 000	8 470 000
San Juan Bajo	592 000	71 000	663 000

## 6.2. Estimation de la charge solide produite par la route 1856

Oreamuno et Villalobos (2013) ont calculé la profondeur et les taux moyens d'érosion – pour la plate-forme, le talus de déblai et le talus de remblai – le long de la route 1856, en surveillant neuf sites répartis le long de la portion de cette voie comprise entre Mojón II et le fleuve Infiernito. Ladite portion inclut les deux glissements de terrain rotationnels, trois ravines, le talus de déblai comprenant le plus de rigoles (16 en tout) et un piège à sédiments retenant des matériaux générés par l'érosion en griffes de la plate-forme de la route et d'un talus de déblai adjacent. Les sites sélectionnés incluent des pentes parmi celles qui sont soumises à l'érosion la plus forte de toute la zone étudiée et représentent par conséquent les pires exemples en matière d'érosion : glissements de terrain, érosion par écoulement dans des griffes ou des rigoles et ravinement le long de la section la plus raide de la route 1856.

Mende & Astorga (2013) ont caractérisé, au prix d'un travail intense sur le terrain, tous les talus de déblai et de remblais jouxtant la route 1856 – sur l'intégralité de la section reliant Mojón II à Delta Costa Rica – sous l'angle de leur position géographique, de la zone environnante, de leur inclinaison, ainsi que du type (glissement de terrain, écoulement dans les rigoles ou des griffes ou bien ravinement) et de la gravité de l'érosion les affectant. Mende & Astorga ont également appliqué les taux d'érosion calculés sur la base des travaux d'Oreamuno et Villalobos pour estimer l'érosion en rigoles et en griffes des talus de déblai et de remblais. Ils ont regroupé les résultats en cinq sections principales de la route correspondant aux bassins majeurs costa-riciens se déversant directement dans le système fluvial San Juan - Colorado.

Sur la base de l'accumulation de sédiments dans un piège recevant le ruissellement d'une zone située sur des pentes très raides et plus particulièrement de la plate-forme d'une route (332 m<sup>2</sup>) et d'un talus de déblai (505 m<sup>2</sup>) avec un facteur *LS USLE* [diminution de la surface selon l'équation universelle de perte de sol] de 2,32, Oreamuno et Villalobos sont parvenus à des taux annuels moyens d'abaissement de la surface du sol dû à l'érosion en griffes de l'ordre de 0,061 et 0,095 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an dans des conditions de saison sèche et de saison des pluies, respectivement. Le plus haut de ces deux taux a servi ici à estimer l'érosion de la plate-forme de la route. Un tel procédé relève d'une démarche doublement prudente, dans la mesure où plus de la moitié de la zone se

déversant dans le piège à sédiments était en fait constituée d'un talus de déblai très raide construit sur un sol nu et où on a supposé que les conditions de la saison humide prévalaient pendant toute l'année. Par conséquent, nous avons choisi un taux annuel moyen d'abaissement de la surface du sol [*lowering of surface* ou *LS* en anglais] consécutive à l'érosion par griffes égal à 0,095 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/an, lequel a ensuite été ajusté en fonction du ratio entre le facteur topographique *LS* de l'USLE (Wischmeier et Smith, 1960) pour la parcelle étudiée et le facteur *LS* d'une section typique de la route. La formule utilisée pour calculer le facteur *LS* figure dans l'équation (2) a été empruntée à McCool *et al.* (1993) :

$$LS = \begin{cases} \left[ \frac{L}{22.13} \right]^{1/2} (10.8 \sin \theta + 0.03) & \theta < 5.143^\circ \\ \left[ \frac{L}{22.13} \right]^{1/2} \left( \frac{\sin \theta}{\sin 5.143^\circ} \right)^{0.6} & \theta \geq 5.143^\circ \end{cases} \quad (2)$$

où *L* = longueur du talus (m) et  $\theta$  = angle du talus (en degrés). L'équation (3) présente la formule mathématique permettant d'appliquer le ratio de réduction (*Ratio<sub>LS</sub>*) au taux d'érosion par griffes observé :

$$Ratio_{LS} = \frac{LS(L_{Route}, \theta_{Route})}{LS(L_{Talus}, \theta_{Talus})}$$

où *LS*(*A*, $\theta$ ) = facteur *LS* selon l'équation (2) correspondant à une section de talus *L* et un angle de talus  $\theta$  dans la zone observée par Oreamuno et Villalobos.

La section la plus raide de la route 1856 est le tronçon de 7 km compris entre Mojón II et l'embouchure du fleuve Infiernito. Pour cette section, nous avons eu recours à une «parcelle-échantillon de route» de 1 m de large et 100 m de long, ainsi qu'à un talus longitudinal de 10 %, avec un facteur *LS* d'une valeur de 2,26. Les talus longitudinaux sont généralement bas le long du reste de la route 1856 et le recours à des «parcelles-échantillon» de 1 m de large sur 16 m de long – avec des inclinaisons transversales de 3 % – signifie que le facteur *LS* associé prend une valeur de 0,46. Par conséquent, le taux d'érosion par griffes fourni par Oreamuno et Villalobos a été ajusté au moyen d'un facteur de 1,03 dans la portion la plus raide de la route 1856 et d'un facteur de 5,09 sur le reste du parcours en pente plus douce. Les taux annuels moyens ajustés de réduction de la surface due à l'érosion par griffes ont été multipliés par la surface de chaque type de parcelle-échantillon de route sur la base d'une largeur moyenne de la plate-forme de la route de 10 m, afin de calculer le volume moyen du matériau érodé.

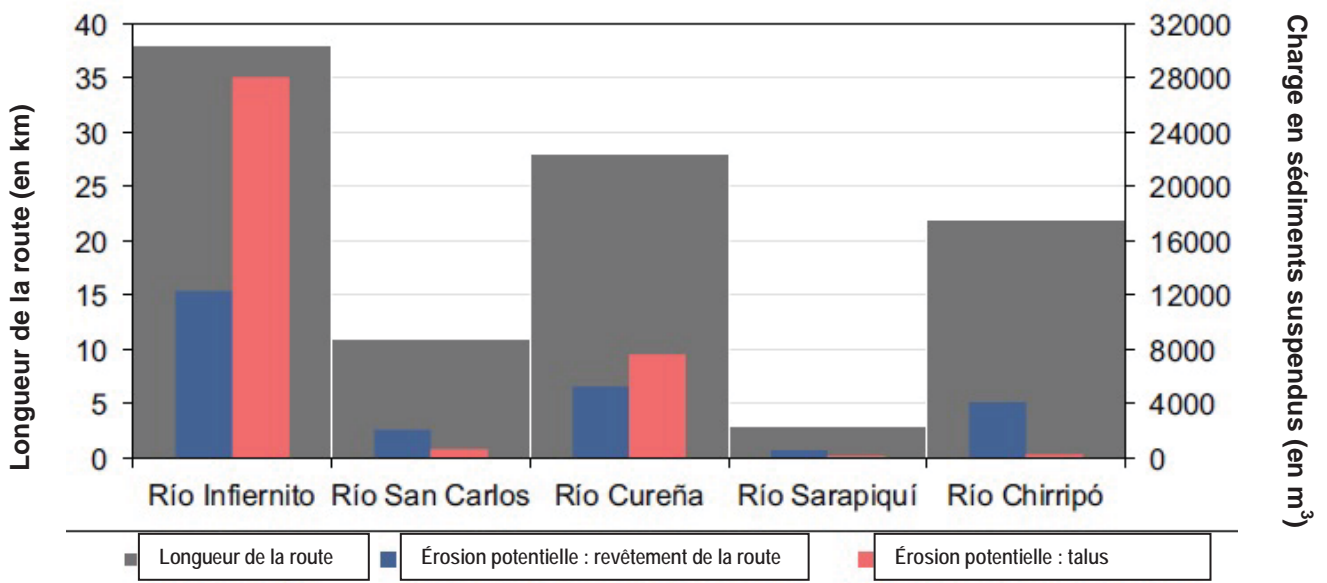
On a supposé une densité volumétrique de 1,67 t/m<sup>3</sup> afin de convertir le volume en une masse. Cette densité est fréquemment utilisée pour représenter la masse volumique des sols de sable et de limon.

Le total des volumes et des masses de sédiments générés chaque année par l'érosion provoquée par la route 1856 est résumé dans le tableau 12 et illustré dans la figure 21. Les estimations relatives à l'érosion de la plate-forme de la route se fondent sur les taux d'abaissement de la surface du sol indiqués par Oreamuno et Villalobos, tandis que l'érosion associée aux opérations de déblayage et de remblayage est celle énoncée dans les conclusions de Mende et Astorga. Sur la base de cet exercice, le volume total des sédiments nés de l'érosion observée le long de la route 1856 pendant un an s'élèverait à 60 780 m<sup>3</sup>, ce qui correspond à 101 550 t.

**Tableau 12.** Augmentation potentielle de la charge solide entraînée dans le San Juan en raison de la construction de la route 1856 (après discrétisation du bassin).

Bassin	Longueur de la route (km)	Volume de l'érosion (m <sup>3</sup> )			Charge solide (t/an)		
		Route <sup>a</sup>	Talus <sup>b</sup>	Total	Route	Talus	Total
<i>Bassins costa-riciens majeurs se déversant directement dans le San Juan</i>							
Infiernito	38	12 260	28 000	40 260	20 450	46 750	67 250
S. Carlos	11	2 060	600	2 660	3 450	1 000	4 450
Cureña	28	5 220	7 560	12 780	8 700	12 650	21 350
Sarapiquí	3	560	160	720	950	250	1 200
Chirripó	22	4 100	260	4 360	6 850	450	7 300
<i>Zone du territoire costa-ricien se déversant directement dans le San Juan</i>							
Total	102	24 200	36 580	60 780	40 400	61 100	101 550

<sup>a</sup>Oreamuno et Villalobos (2013) <sup>b</sup>Mende et Astorga (2013).

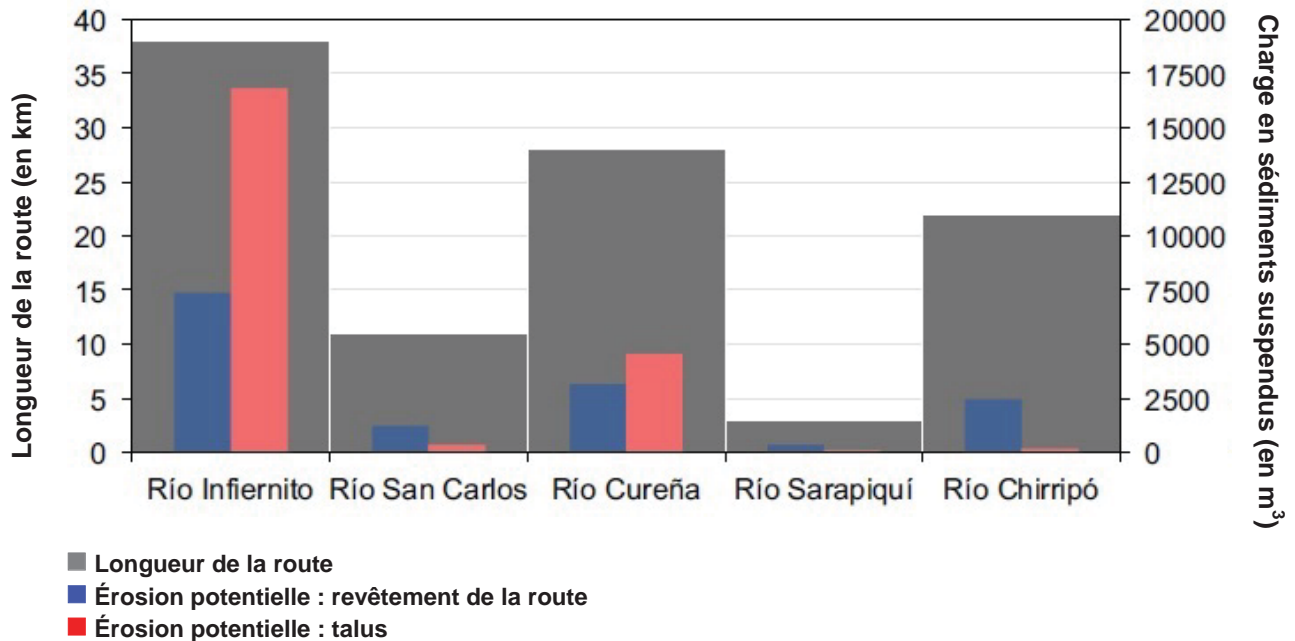


**Figure 21.** Érosion potentielle générée par la plate-forme, ainsi que par les talus de déblai et de remblais, en raison de la construction de la route 1856 (ventilation par bassin d'affluent avec indication de la longueur de la portion de route associée à chaque bassin)

Un ratio moyen de production des sédiments de 0,31 a été calculé sur la base de l'érosion potentielle du sol et des apports solides estimés à l'aide du modèle CALSITE pour les bassins fluviaux majeurs du Costa Rica se déversant directement dans le San Juan. Cependant, ce ratio de production des sédiments est lié à des processus hydrologiques et sédimentologiques de systèmes fluviaux plus importants incluant des bassins de drainage d'une superficie de l'ordre de 10 000 km<sup>2</sup>. Ledit ratio est, par conséquent, inapplicable aux petites zones de drainage entourant la route 1856 (~ 3,5 km<sup>2</sup>) en raison des différences d'échelle. Conscients de ce fait, nous avons sélectionné un ratio de production des sédiments de 0,60 pour l'apport solide généré par cet ouvrage dans le San Juan, en tenant compte de la taille modeste des zones de drainage et de la répartition de la taille des particules de sédiment générées par l'érosion de la route 1856, telle qu'elle a été analysée par Oreamuno et Villalobos (2013). Le tableau 13 et la figure 22 indiquent la quantité de sédiments générée par la route entrant dans le San Juan sur la base d'un ratio de production de 0,60. Selon ces chiffres, le volume total de sédiments généré par la route 1856 et déversé dans le San Juan en un an est estimé à 36 500 m<sup>3</sup>, soit 60 800 t sur la base d'une densité volumétrique de 1,67 t/m<sup>3</sup>.

**Tableau 13.** Augmentation de l'apport solide dans le fleuve dû à la construction de la route 1856 (après discrétisation du bassin)

Bassin	Longueur de la route (km)	Volume de l'érosion (m <sup>3</sup> )			Charge solide (t an <sup>-1</sup> )		
		Route <sup>a</sup>	Talus <sup>b</sup>	Total	Route	Talus	Total
<i>Bassins costa-riciens majeurs se déversant directement dans le San Juan</i>							
Infiernito	38	7 360	16 800	24 160	12 250	28 050	40 300
S. Carlos	11	1 240	360	1 600	2 050	600	2 650
Cureña	28	3 140	4 540	7 680	5 200	7 600	12 800
Sarapiquí	3	340	100	440	550	150	700
Chirripó	22	2 460	160	2 620	4 100	250	4 350
<i>Zone costa-ricienne se déversant directement dans le San Juan</i>							
Total	102	14 540	21 960	36 500	24 150	36 650	60 800



**Figure 22.** Apports solides dans le San Juan dus à la construction de la route 1856 (ventilation par bassin d'affluent avec indication de la longueur de la portion de route associée à chaque bassin).

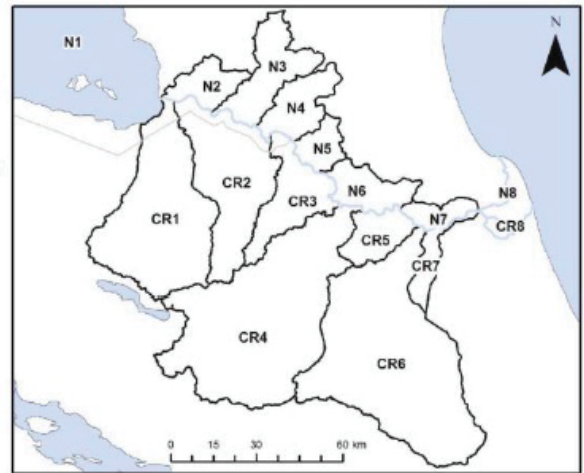
### 6.3. Diagrammes du bilan sédimentaire avant et après la construction de la route 1856

La charge solide annuelle moyenne de tous les bassins se déversant dans le San Juan, ainsi que du lac Nicaragua, telle qu'elle est indiquée dans le tableau 11 correspond à la période postérieure à la construction de la route 1856. Ces résultats ont servi à créer des diagrammes illustrant le bilan du transport sédimentaire avant et après la route 1856 dans le système fluvial San Juan - Colorado (figures 23 et 24). Les diagrammes représentent graphiquement les entrées, les flux et les sorties de sédiments en indiquant la largeur du cours principal et de chacun de ses affluents/défluentés classés selon leur apport solide annuel moyen. Dans ces diagrammes, l'apport solide antérieur à la construction de la route 1856 (tel qu'il est illustré dans la figure 23) a été calculé en soustrayant — du bilan sédimentaire postérieur à la construction (tel qu'il est illustré dans la figure 24) — les estimations associées aux scénarios les plus pessimistes, spatialement distribuées, de l'apport sédimentaire dû à la route 1856, telles qu'elles sont exposées dans la section 6.2.

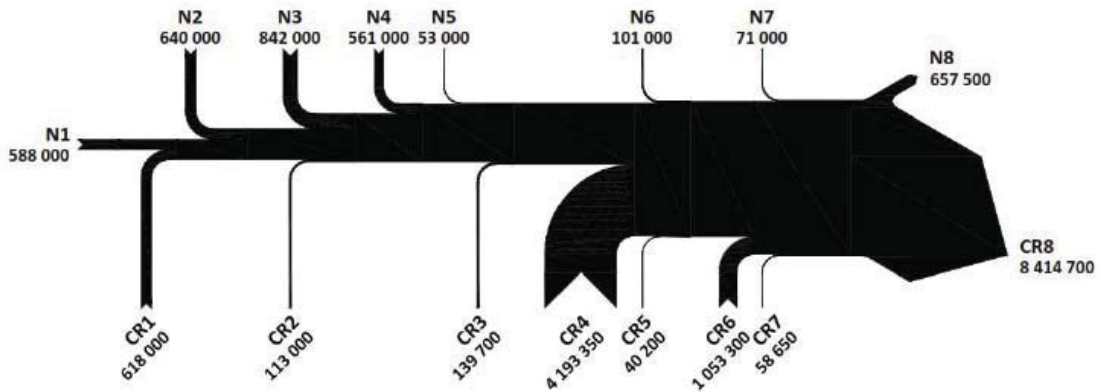


Symbologie :

N1 : lac Nicaragua	CR1 : bassin du Frío
N2 : bassin de la Melchora	CR2 : bassin du Pocosol
N3 : bassin du Sábalos	CR3 : bassin de l'Infiernito
N4 : bassin du Santa Cruz	CR4 : bassin du San Carlos
N5 : bassin du Bartola	CR5 : bassin de la Cureña
N6 : bassin du Machado	CR6 : bassin du Sarapiquí
N7 : bassin de Las Banderas	CR7 : bassin du Chirripó
N8 : Cours inférieur du San Juan	CR8 : fleuve Colorado



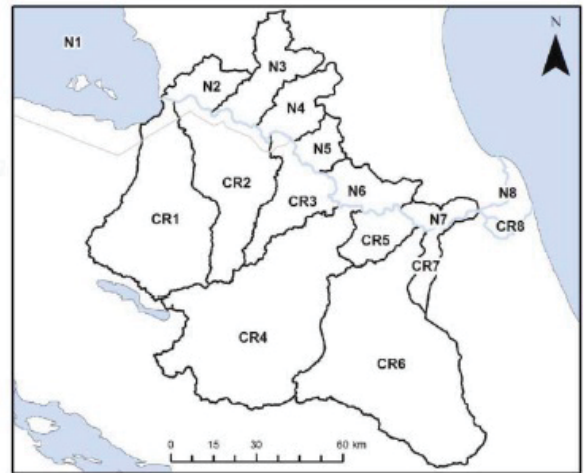
Apport solide total (t/an)



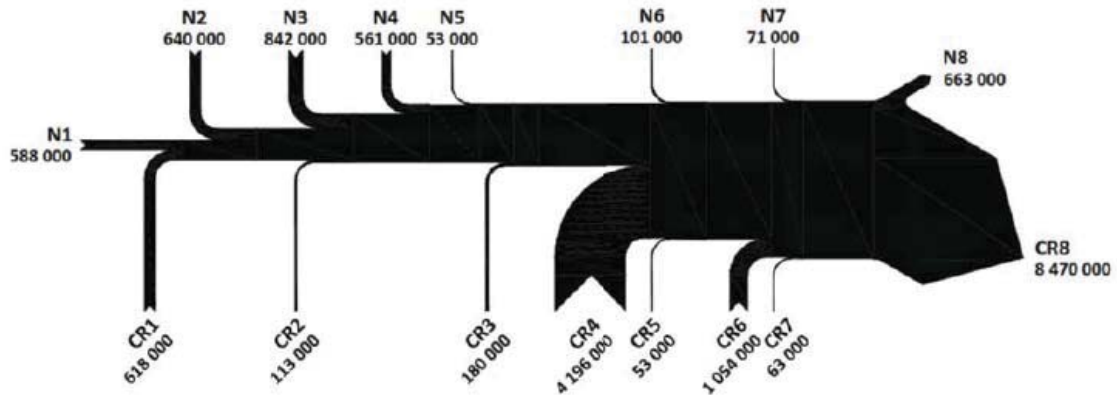
**Figure 23.** Bilan sédimentaire annuel moyen avant la construction de la route 1856. Ces chiffres incluent les sédiments en suspension et les charges de fonds à la fois des bassins costa-riciens et nicaraguayens. La largeur des flèches entrantes est proportionnelle à l'apport solide de chaque affluent qui se jette dans le San Juan entre Mojón II et la bifurcation entre le cours inférieur du San Juan et le Colorado à la hauteur de Delta Costa Rica.

Symbologie :

N1 : lac Nicaragua	CR1 : bassin du Frío
N2 : bassin de la Melchora	CR2 : bassin du Pocosol
N3 : bassin du Sábalos	CR3 : bassin de l'Infiernito
N4 : bassin du Santa Cruz	CR4 : bassin du San Carlos
N5 : bassin du Bartola	CR5 : bassin de la Cureña
N6 : bassin du Machado	CR6 : bassin du Sarapiquí
N7 : bassin de Las Banderas	CR7 : bassin du Chirripó
N8 : Cours inférieur du San Juan	CR8 : fleuve Colorado



Apport solide total (t/an)



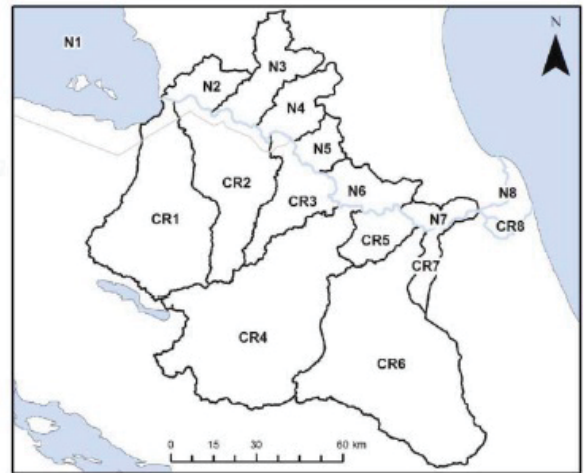
**Figure 24.** Bilan sédimentaire annuel moyen après la construction de la route 1856. Ces chiffres incluent les sédiments en suspension et les charges de fonds à la fois des bassins costa-riciens et nicaraguayens. La largeur des flèches entrantes est proportionnelle à l'apport solide de chaque affluent qui se jette dans le San Juan entre Mojón II et la bifurcation (entre le cours inférieur du San Juan et le Colorado) à la hauteur de Delta Costa Rica.

Comme à chaque étape, les valeurs détaillées de l'apport solide en sédiments en suspension et en charge de fonds ont été calculées séparément : des bilans sédimentaires supplémentaires ont été intégrés pour représenter les bilans individuels (sédiments en suspension, charge de fonds et charge solide totale), avant et après la construction de la route 1856. Ces diagrammes figurent à l'appendice I.

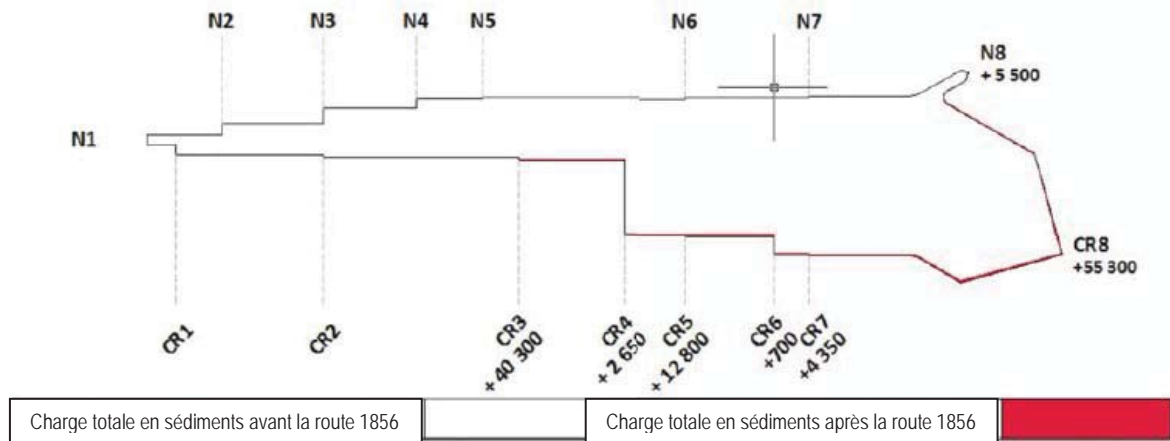
Enfin, les deux diagrammes représentant le bilan sédimentaire avant et après la construction de la route 1856 (Figures 23 et 24) ont été superposés de manière à illustrer la contribution relative de la charge solide supplémentaire pouvant être attribuée à cette construction (voir la figure 25).

Symbologie :

N1 : lac Nicaragua	CR1 : bassin du Frío
N2 : bassin de la Melchora	CR2 : bassin du Pocosol
N3 : bassin du Sábalos	CR3 : bassin de l'Infiernito
N4 : bassin du Santa Cruz	CR4 : bassin du San Carlos
N5 : bassin du Bartola	CR5 : bassin de la Cureña
N6 : bassin du Machado	CR6 : bassin du Sarapiquí
N7 : bassin de Las Banderas	CR7 : bassin du Chirripó
N8 : Cours inférieur du San Juan	CR8 : fleuve Colorado



### Augmentation de la charge solide attribuable à la route 1856 (t/an)



**Figure 25.** Les augmentations de la charge solide moyenne entrant dans le système fluvial San Juan — Colorado en raison de la construction de la route 1856 sont représentées par des lignes rouges dans cette version du diagramme illustrant le bilan sédimentaire. Les apports consistant en sédiments produits par la route sont chiffrés : par exemple, l'augmentation moyenne annuelle la plus importante de la charge solide entrant dans le San Juan est de +40 300 t/an et provient de la zone CR5 (le bassin de l'Infiernito). La bande rouge étroite est correctement mise à l'échelle et décrit précisément le volume des apports attribuables à la route 1856, lesquels sont si modestes par rapport aux charges solides d'avant la construction qu'ils sont non seulement difficiles à voir, mais aussi sans conséquence et pratiquement indétectables.

### 6.4. Processus d'envasement du cours inférieur du San Juan

Le diagramme de la figure 25 représentant la charge solide avant et après la route 1856 montre bien que l'augmentation de l'apport sédimentaire annuel moyen dans le cours inférieur du San Juan est de 5 500 t/an. À supposer une densité volumétrique de  $1,67 \text{ t/m}^3$ , cette augmentation représente une masse d'environ  $3\,300 \text{ m}^3/\text{an}$ . La consultation d'images satellite récentes confirme que la longueur du cours inférieur du San Juan est d'environ 30 km, tandis que l'analyse des 40 coupes transversales du fleuve révèle que la largeur moyenne de son chenal est de 92,2 m. La multiplication de ces deux nombres suggère que la superficie du cours inférieur du San Juan serait d'environ  $2,77 \text{ km}^2$ .

Sur la base des hypothèses extrêmement prudentes selon laquelle l'intégralité de l'apport sédimentaire généré par la route 1856 et entrant dans le cours inférieur du San Juan se déposerait dans ce chenal, l'élévation résultante du lit du cours d'eau serait en moyenne de 1,2 mm/an, soit le diamètre d'un seul grain de sable moyennement gros. Au moment d'évaluer le risque d'envasement associé à ce phénomène, aussi minime soit-il, il convient de se rappeler qu'il s'agit là d'une appréciation relevant de la limite supérieure, dans la mesure où des hypothèses extrêmement prudentes ont été formulées à chaque stade de l'estimation de l'érosion, du ratio de production des sédiments et de l'apport solide attribuables à la route 1856. Il s'ensuit que la modification potentielle de l'élévation du lit du cours inférieur du San Juan due à la construction de la route 1856 est non seulement négligeable, mais relève de la marge d'erreur de tout calcul et, en tout cas, n'excède pas la tolérance admise concernant la mesure de l'élévation du lit, ce qui rend son impact quasiment imperceptible.

## 7. CONCLUSIONS

Nous avons procédé à une étude hydrologique et sédimentologique complète en intégrant différentes mesures pertinentes effectuées depuis le début des années 1960 jusqu'à aujourd'hui, à la fois dans les bassins costa-riciens se déversant dans le San Juan et dans le fleuve lui-même.

Force est de conclure, sur la base des données existantes, à l'absence de preuves scientifiques d'une variation quelconque – le long du système fluvial San Juan-Colorado – de la relation naturelle entre le débit et les concentrations de sédiments en suspension attribuables à la construction de la route 1856 ou d'un changement dans la charge solide représentée par ces sédiments. Pas plus qu'il n'existe la moindre preuve scientifique permettant d'avancer que la relation entre le débit et les concentrations de sédiments en suspension n'est pas la même pendant la saison sèche et la saison des pluies.

En vertu de l'hypothèse extrême selon laquelle, après la construction de la route 1856, l'intégralité de cet ouvrage et des talus adjacents serait immédiatement devenue totalement imperméable, l'augmentation globale de la zone imperméable pour l'ensemble des systèmes (petits et grands) de bassin du fleuve est de 0,08 %. Dans le cadre de l'étude de l'effet de ce changement sur le régime hydrologique de 80 microbassins costa-riciens se déversant directement dans le San Juan, nous avons conclu – sur la base de deux méthodes différentes et d'un niveau de confiance à 95 % – à l'absence de preuves scientifiques d'un changement du régime hydrologique (débit) desdits microbassins pouvant être attribué à la construction de la route 1856. De plus, après avoir élargi l'analyse – afin qu'elle porte non plus seulement sur les 80 microbassins, mais aussi sur les 7 bassins majeurs du Costa Rica se déversant également dans le San Juan – nous avons conclu à l'impossibilité de prouver l'existence d'un changement quelconque du régime hydrologique du système de bassins attribuable à la construction de la route 1856. En outre, la comparaison graphique des régimes de débit (antérieur et postérieur à la route) des bassins costa-riciens révèle l'impossibilité de discerner le moindre effet hydrologique pouvant être attribué à ce projet.

Un modèle distribué avancé (CALSITE) a été calibré en recourant à des données et des informations disponibles sur la charge solide réelle charriée par différents cours d'eau costa-riciens, de manière à estimer les charges de sédiments en suspension produites par chacun des bassins costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan. Les apports en charge de fonds ont également été estimés en recourant à la méthode d'Einstein reposant sur des mesures. En utilisant des niveaux d'apport solide obtenus par modélisation, les données disponibles concernant les charges de sédiments en suspension et les charges de fonds estimées, le bilan sédimentaire actuel (postérieur à 2010) pour l'intégralité du système fluvial a pu être affiné en tenant compte de l'érosion inhérente aux ravines et aux glissements de terrain.

Les résultats du suivi de l'érosion et de l'inventaire de tous les talus de déblai et de remblais le long de la route 1856 – depuis Mojón II jusqu'à l'endroit de la bifurcation entre le cours inférieur du San Juan et le Colorado à la hauteur de Delta Costa Rica – ont été combinés dans le cadre d'une application de l'USLE et d'une hypothèse prudente relative au ratio de production des sédiments des petits bassins, afin d'estimer l'augmentation de l'apport solide annuel moyen entrant dans le San Juan et pouvant être attribué à la construction de la route 1856. L'apport moyen annuel résultant de 36 500 m<sup>3</sup>/an (soit 60 800 t/an) représente «un scénario pessimiste» dans la mesure où des hypothèses prudentes ont été formulées à chaque stade de l'estimation. L'apport solide généré par la route a été combiné au bilan sédimentaire, afin de produire des diagrammes illustrant le bilan total du système fluvial San Juan-Colorado dans des conditions antérieures et postérieures à la construction de la route 1856. Ces diagrammes constituent une représentation simple et visuelle de l'ampleur de la contribution de la charge solide générée par la route comparée à la charge solide naturelle charriée par le San Juan sur toute sa longueur (y compris son cours inférieur) pendant une année moyenne. La figure 25 montre que la contribution de la route 1856 est tellement modeste, par rapport aux charges solides mesurées avant la construction, qu'elle est quasiment indétectable.

Dans le cadre de l'interprétation de cette analyse, il convient également de rappeler que tous les chiffres cités sont des moyennes comportant une certaine dose d'incertitude scientifique et que, en tout cas, le chargement annuel est de toute façon naturellement variable. Il s'ensuit que l'apport estimé de sédiments générés par la route (60 800 t/an) doit être comparé à l'incertitude entourant la charge solide annuelle charriée par le San Juan. Par exemple, l'intervalle de confiance à 95 % concernant la charge annuelle moyenne pour les sédiments en suspension est compris entre 5 181 000 et 7 966 000 t/an, soit plus de 50 fois l'apport estimé des sédiments générés par la route.

Enfin, il a été démontré que, même en recourant à des hypothèses prudentes pour parvenir à une estimation pessimiste de l'apport annuel des sédiments générés par la route, puis en supposant que l'intégralité de la charge solide supplémentaire entrant dans la partie inférieure du San Juan se déposerait, le changement résultant de l'évaluation du lit du fleuve serait non seulement négligeable, mais également non mesurable.



## BIBLIOGRAPHIE

- Bradbury, P., Lea, N. & Bolton, P. (1993). Estimating catchment sediment yield: Development of the GIS-based CALSITE model (Project Report). Oxfordshire, United Kingdom: HR Wallingford.
- Einstein, H.A. (1950). The bed-load function for sediment transportation in open channel flows (Technical bulletin). Washington, United States: U.S. Department of Agriculture.
- Gómez-Delgado, F. (2002). Evaluation of the potential erosion and sediment yield in three basins of Costa Rica (Grade thesis). University of Costa Rica, San José, Costa Rica. (in Spanish).
- Gómez-Delgado, F. (2004). Report on the spatial distribution of the potential erosion and sediments production in the basin defined for the Peñas Blancas Hydroelectric Plant. Volume B1. ICE, San José, Costa Rica. (in Spanish).
- Gómez-Delgado, F., Marchamalo-Sacristán, M. & Laporte-Molina, S. (2011). Calibrating a distributed model to estimate the sediment input rate to the Peñas Blancas reservoir in Costa Rica. In: J. D. Brea & F. Balocchi (Ed.), Erosion - Sedimentation Processes in rivers and basins (in Spanish). Technical Document No. 28. Montevideo, Uruguay: IHP-LAC, UNESCO.
- Hawkins, R.H., Ward, T.J., Woodward, D.E. y Van Mullen, J.A. (2009). Curve number hydrology – State of the practice. United States of America: American Society of Civil Engineers.
- Instituto Costarricense de Electricidad (1973) Documentos de registro de la estación 690103 La Trinidad. San José, Costa Rica: Author.
- Instituto Costarricense de Electricidad (2010) Criterio técnico sobre las eventuales implicaciones ambientales del desarrollo del Proyecto Hidroeléctrico Brito - San Isidro de la República de Nicaragua, sobre el territorio de Costa Rica. San José, Costa Rica: Author.
- Instituto Costarricense de Electricidad (2011) Estimación de caudal en la estación 690103 La Trinidad. San José, Costa Rica: Author.
- INETER (2001) Boletín Hidrológico No. 2. Managua, Nicaragua. <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/boletin/edanterior/Bol22001/caudales.htm>
- INETER (2002) Boletín Hidrológico No. 4. Managua, Nicaragua. <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/boletin/edanterior/Bol42002/bol4pag4.htm>
- INETER (2006) Boletín Hidrológico No. 11. Managua, Nicaragua. <http://webserver2.ineter.gob.ni/Direcciones/Recursos%20Hidricos/boletin/edanterior/Bol062006/bol06pag1.html>
- Leblois, E. & Sauquet, E. (2000). Grid elevation models in hydrology – Part 1: Principles and a literature review; Part 2: HydroDem, User's manual. Cemagref, Technical Notes, Lyon, France.
- Marchamalo, M., Gómez-Delgado, F., Gonzalez, B. (2007). Quantification of soil and water conservation potential based on territorial analysis of the catchment. Birris basin case study (in Spanish). Technical report. Turrialba, Costa Rica: CATIE-UICN.

Marchamalo, M., Vignola, R., Gómez-Delgado, F. and González-Rodrigo, B. (2012) Quantifying Services and Identifying Watershed Priority Areas for Soil and Water Conservation Programs. In B. Rapidel, F. DeClerk, J.F. Le Coq J. Beer, Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry, Measurement and Payment. London, United Kingdom: Earthscan.

McCool, D.K., George, G.O., Freckleton, M., Douglas, C.L. & Papendick, R.I. (1993). Topographic effect on erosion from cropland in the Northwestern wheat region. Trans. ASAE 36 (s).

Mende, A. & Astorga, A. (2013). Inventory of slopes and water courses related to the Border Road N° 1856 between Mojón II and Delta Costa Rica. San José, Costa Rica: Authors.

Oreamuno-Vega, R.A & Villalobos-Herrera, R. (2013). Systematic Field monitoring of Erosion and Sediment Yield along Route 1856. San José, Costa Rica: Centro de investigaciones en desarrollo sostenible CIEDES – Universidad de Costa Rica.

Poesen, J., Nachtergaele, J., Verstraeten, G. & Valentin, C. (2003). Gully erosion and environmental change: importance and research needs. CATENA 50, 91-133.

Wischmeier, W. H. & Smith, D.D. (1960). A universal soil-loss equation to guide conservation farm planning. Transactions of the 7th International Congress Soil Science. Brussels, Belgium.

**APPENDICE A**

**COURBES DE TARAGE DES SÉDIMENTS EN SUSPENSION**

**CHARGE MENSUELLE MOYENNE DES SÉDIMENTS EN SUSPENSION**

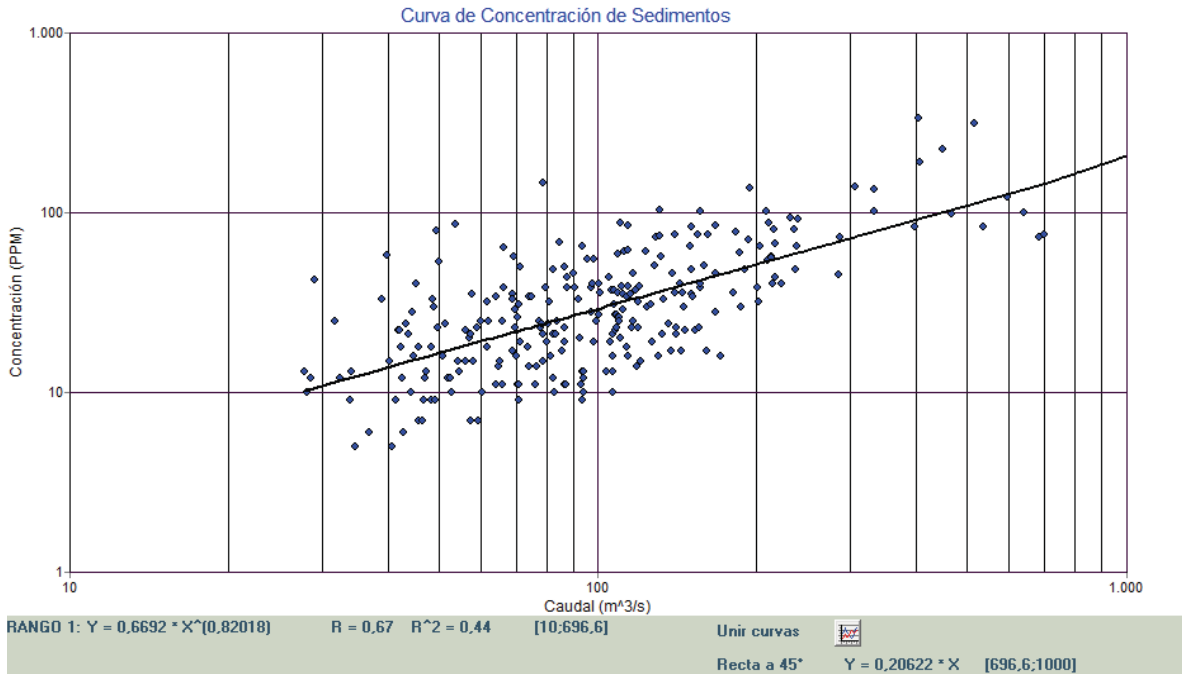
**CHARGE ANNUELLE MOYENNE DES SÉDIMENTS EN SUSPENSION**

**Stations de mesure des sédiments :**

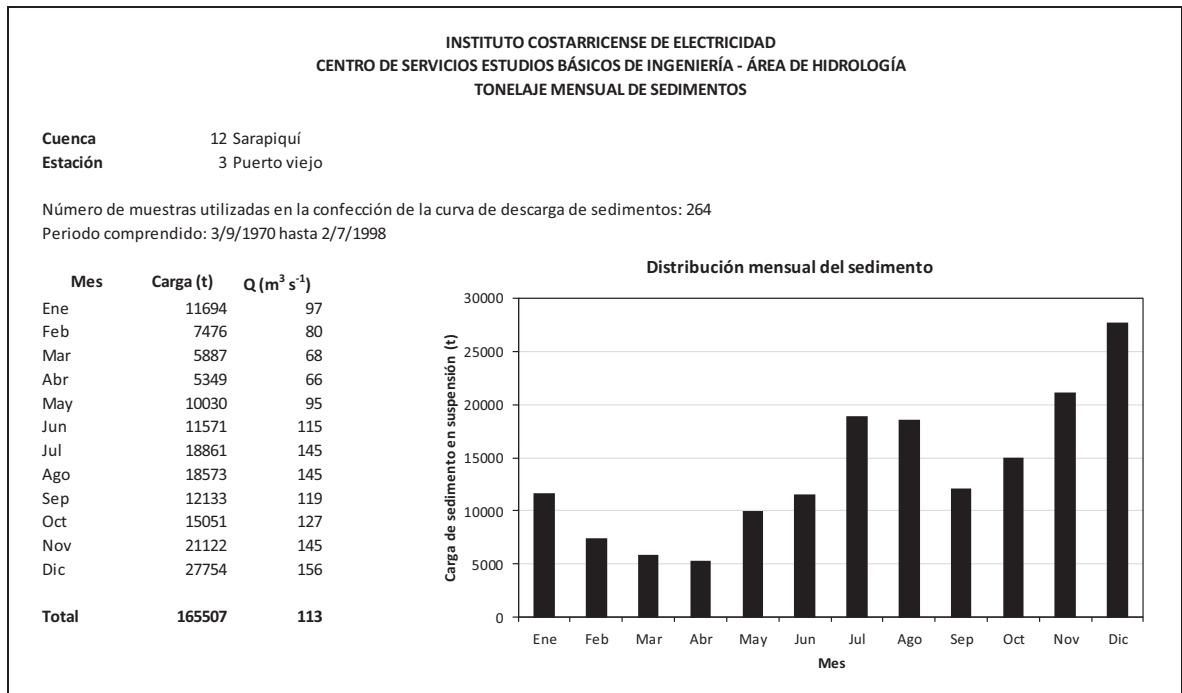
**12-03, 12-04, 12-05, 12-06, 12-11, 12-13, 14-02, 14-04, 14-05, 14-20, 16-02 et 16-05**

## Station 12-03 Puerto Viejo

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



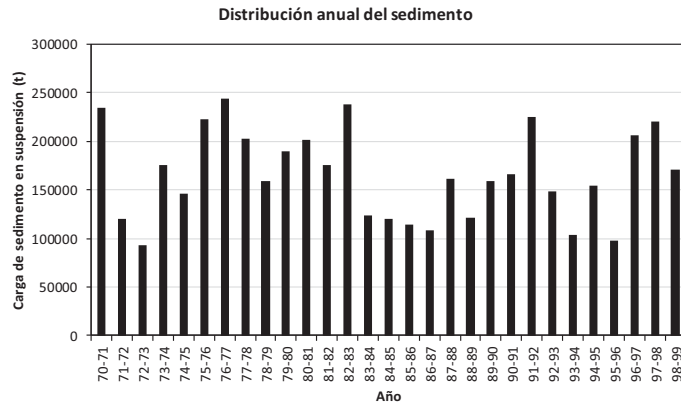
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 12 Sarapiquí  
Estación 3 Puerto viejo

Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 264  
Período comprendido: 3/9/1970 hasta 2/7/1998

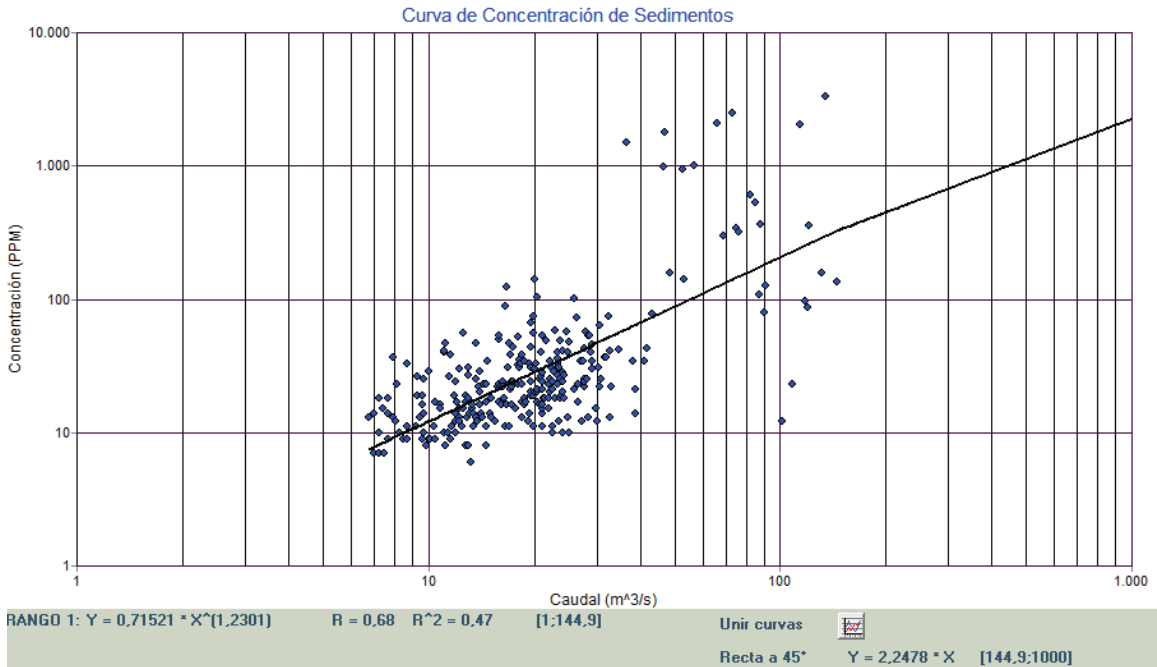
Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
70-71	234408	158
71-72	120631	105
72-73	92570	86
73-74	175977	117
74-75	145769	106
75-76	223037	126
76-77	243577	137
77-78	202756	125
78-79	159076	114
79-80	189341	129
80-81	201006	130
81-82	176042	115
82-83	238041	134
83-84	123430	98
84-85	119953	99
85-86	114667	91
86-87	108464	95
87-88	160890	111
88-89	120804	100
89-90	158884	113
90-91	166336	116
91-92	224847	130
92-93	147813	109
93-94	103078	87
94-95	154481	104
95-96	97271	84
96-97	205561	133
97-98	220696	129
98-99	170323	119
<b>Promedio</b>	<b>165508</b>	<b>114</b>



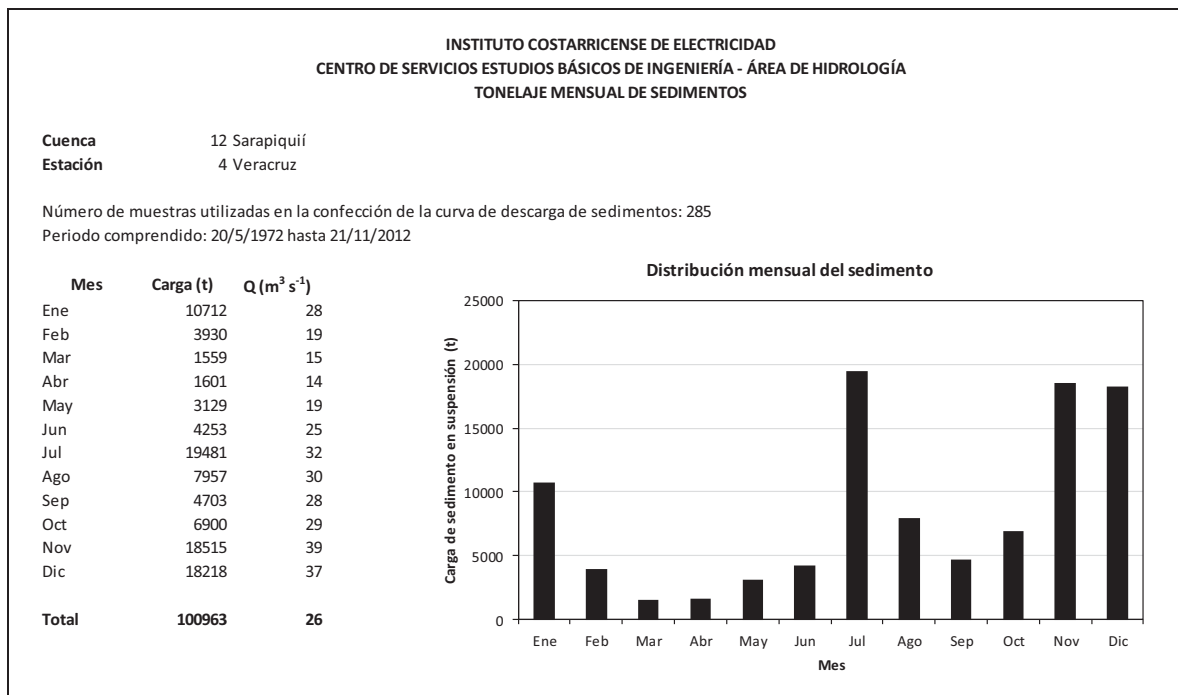


## Station 12-04 Veracruz

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



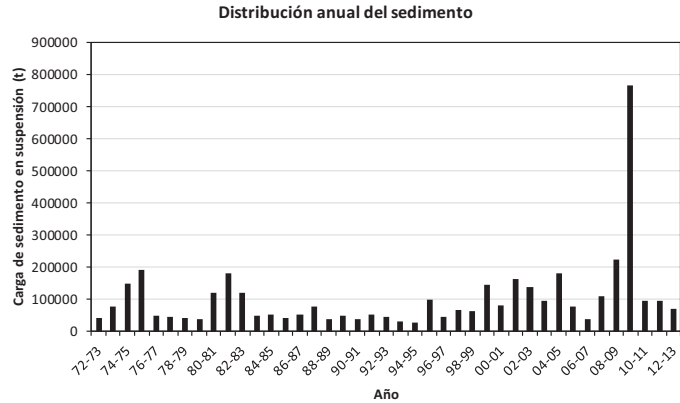
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 12 Sarapiquí  
Estación 4 Veracruz

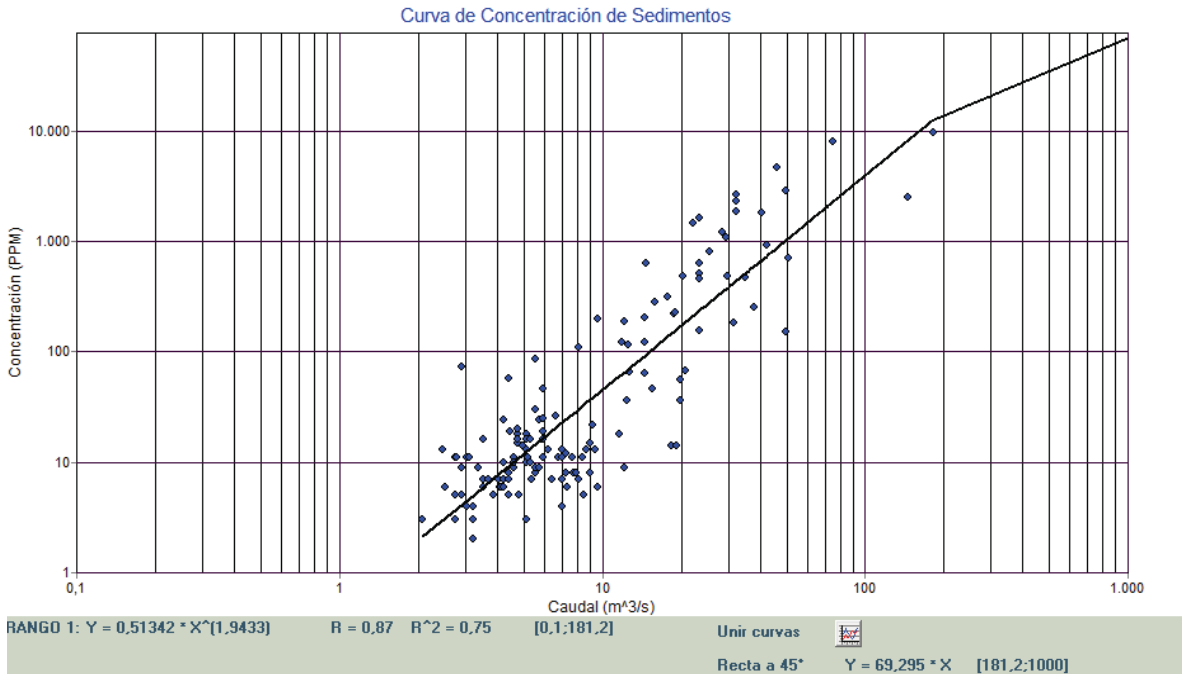
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 285  
Período comprendido: 20/5/1972 hasta 21/11/2012

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
72-73	40870	23
73-74	77962	27
74-75	149836	29
75-76	192446	36
76-77	49434	23
77-78	45056	22
78-79	39687	21
79-80	38343	22
80-81	118947	32
81-82	180135	33
82-83	117903	27
83-84	49813	21
84-85	50687	24
85-86	40702	20
86-87	51858	23
87-88	78379	23
88-89	36374	22
89-90	47104	24
90-91	37947	22
91-92	52341	23
92-93	45820	23
93-94	31575	19
94-95	26732	18
95-96	97421	25
96-97	43442	24
97-98	66243	25
98-99	61921	25
99-00	144185	34
00-01	81910	28
01-02	161940	34
02-03	138578	31
03-04	94847	32
04-05	180686	36
05-06	77222	25
06-07	37360	20
07-08	107278	26
08-09	223069	39
09-10	765172	52
10-11	94483	29
11-12	95607	25
12-13	68147	26
<b>Promedio</b>	<b>100963</b>	<b>27</b>

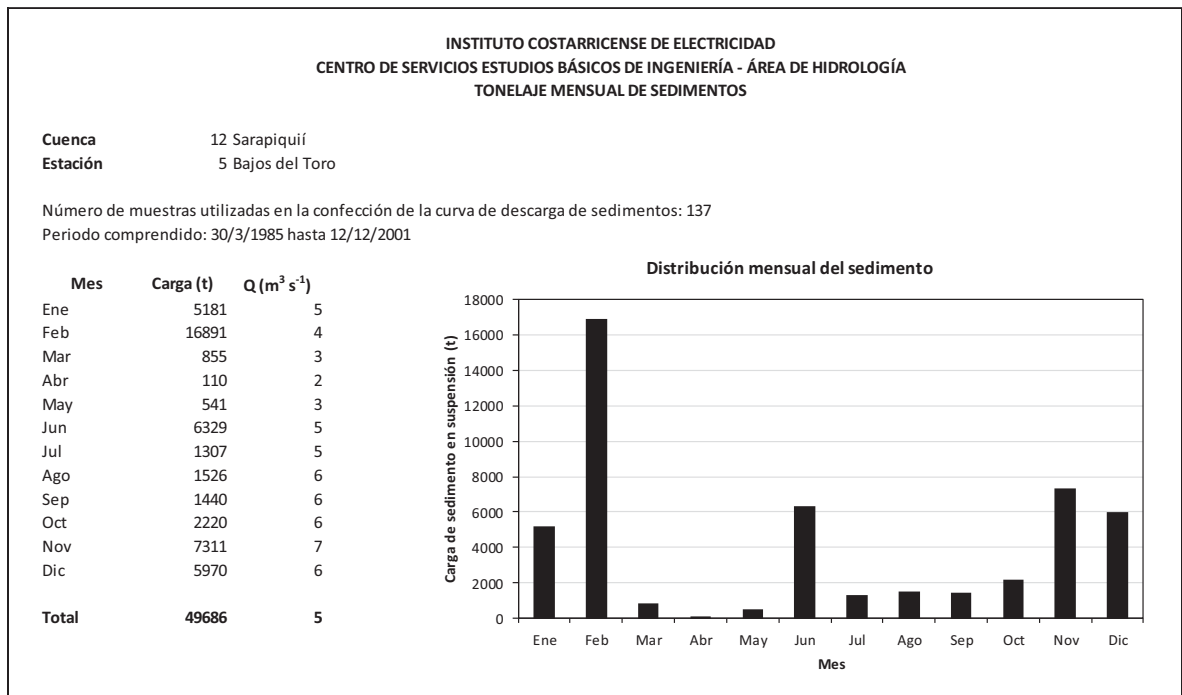


## Station 12-05 Bajos del Toro

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



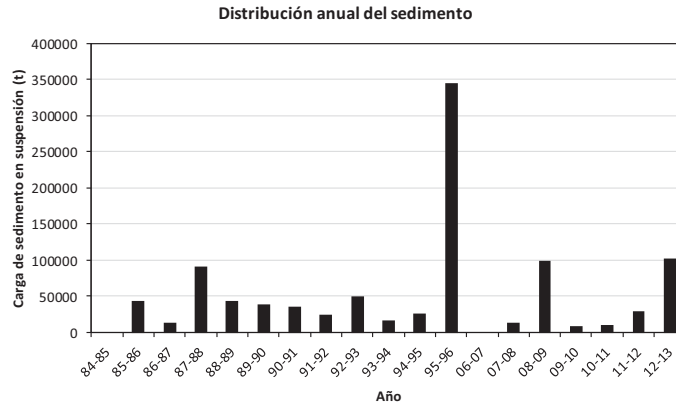
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD**  
**CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA**  
**TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS**

**Cuenca** 12 Sarapiquí  
**Estación** 5 Bajos del Toro

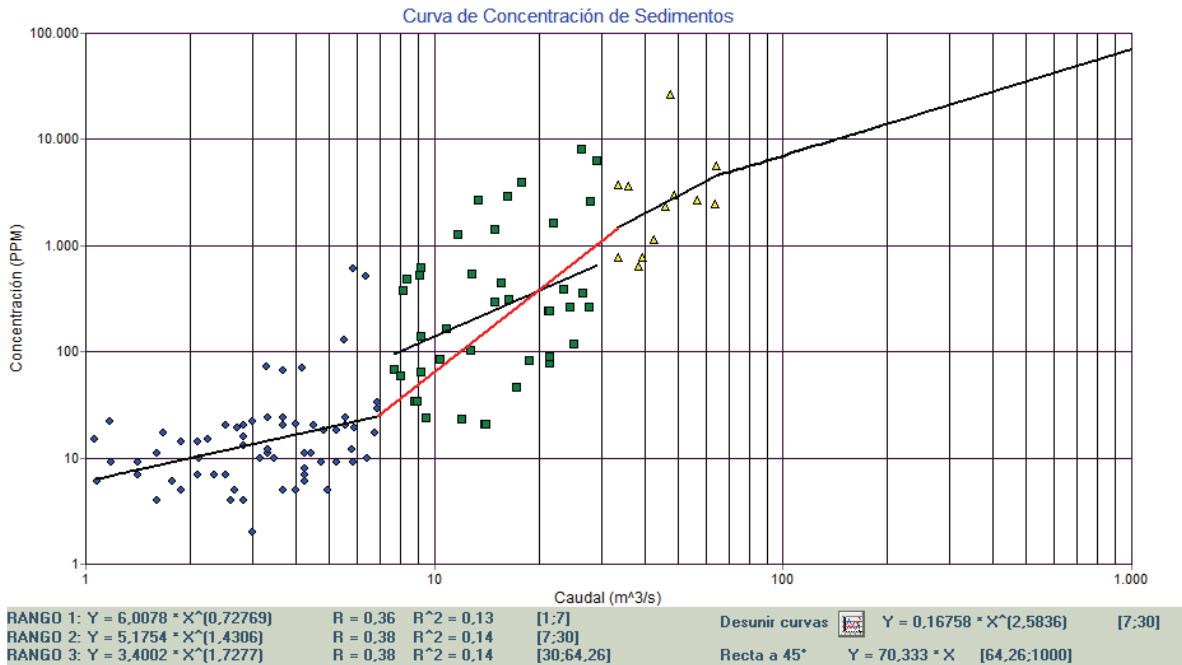
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 137  
 Periodo comprendido: 30/3/1985 hasta 12/12/2001

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
84-85	0	3
85-86	43305	7
86-87	14209	6
87-88	90750	7
88-89	43274	8
89-90	39381	7
90-91	35238	7
91-92	24795	6
92-93	50576	8
93-94	16758	6
94-95	26557	6
95-96	344493	7
06-07	0	1
07-08	12739	1
08-09	99342	4
09-10	8928	1
10-11	10945	1
11-12	29518	1
12-13	102834	1
<b>Promedio</b>	<b>49686</b>	<b>4</b>

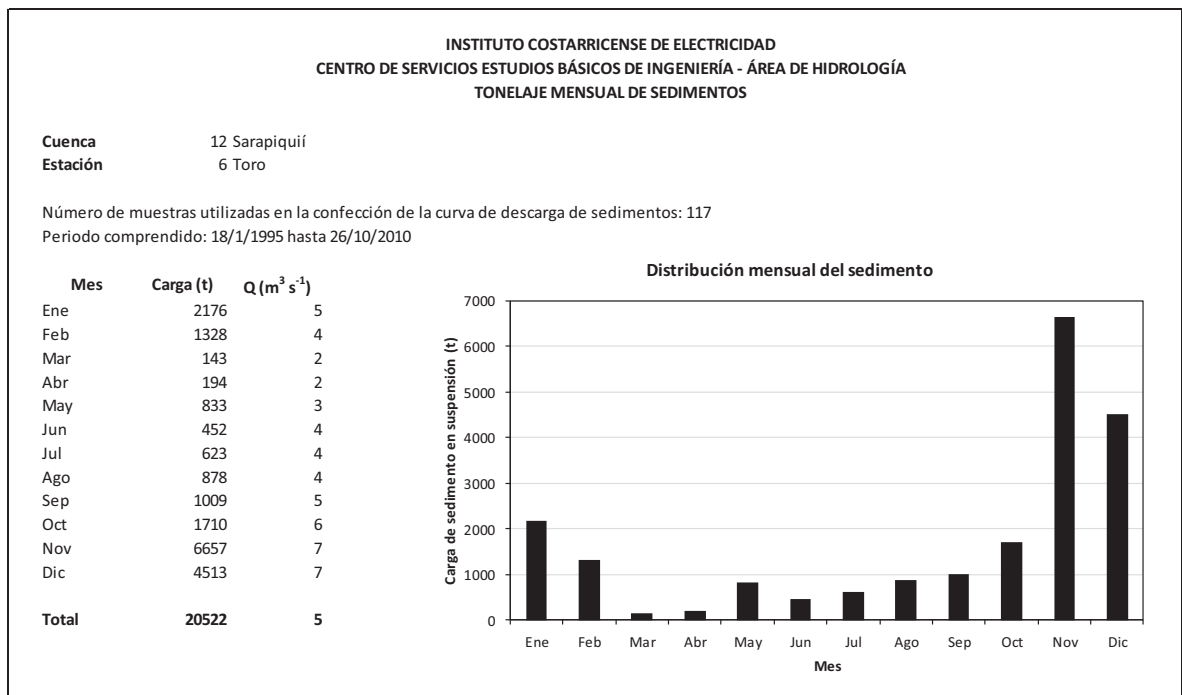


## Station 12-06 Toro

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension





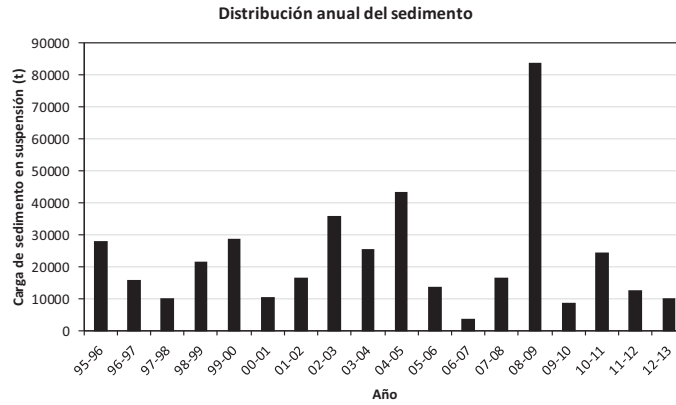
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 12 Sarapiquí  
Estación 6 Toro

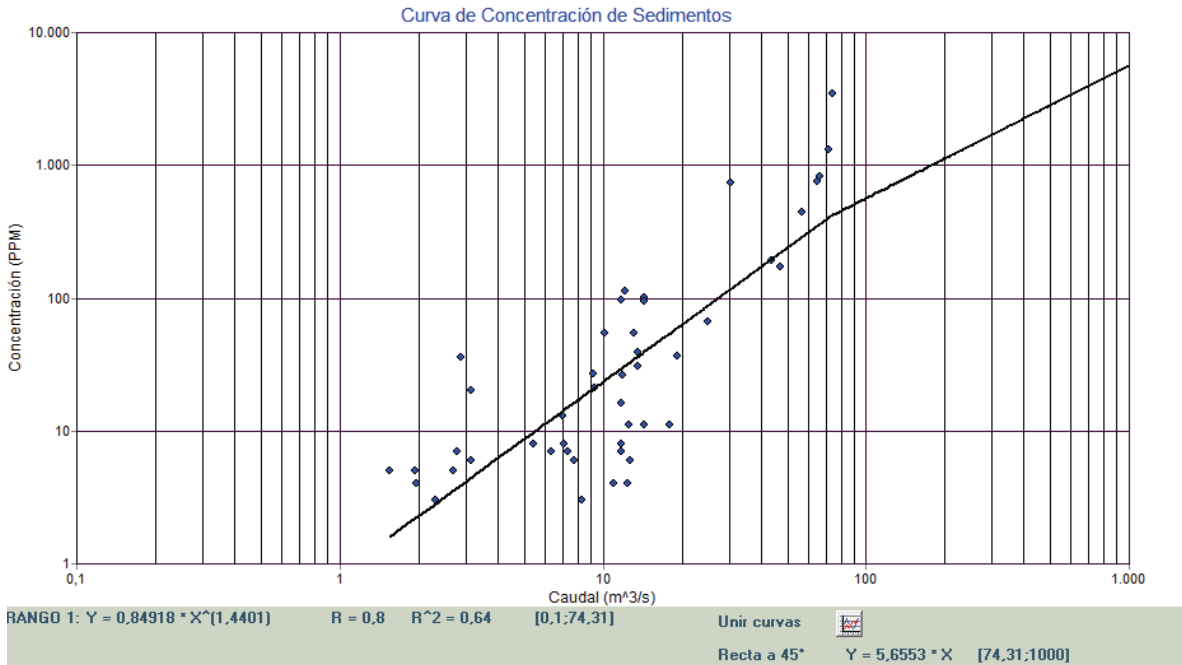
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 117  
Periodo comprendido: 18/1/1995 hasta 26/10/2010

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
95-96	27859	4
96-97	15742	5
97-98	10212	4
98-99	21619	5
99-00	28846	5
00-01	10469	4
01-02	16666	4
02-03	35840	4
03-04	25585	6
04-05	43453	6
05-06	13864	4
06-07	3679	3
07-08	16648	4
08-09	83605	6
09-10	8683	4
10-11	24324	5
11-12	12587	4
12-13	10284	4
<b>Promedio</b>	<b>20522</b>	<b>4</b>

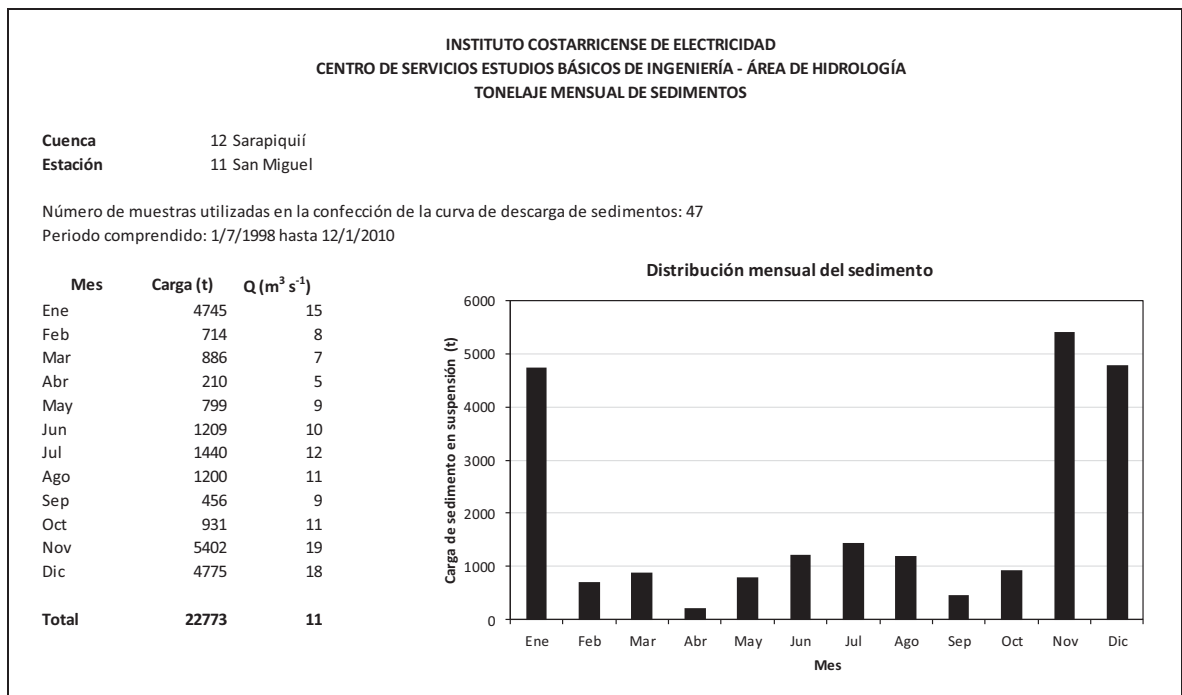


## Station 12-11 San Miguel

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



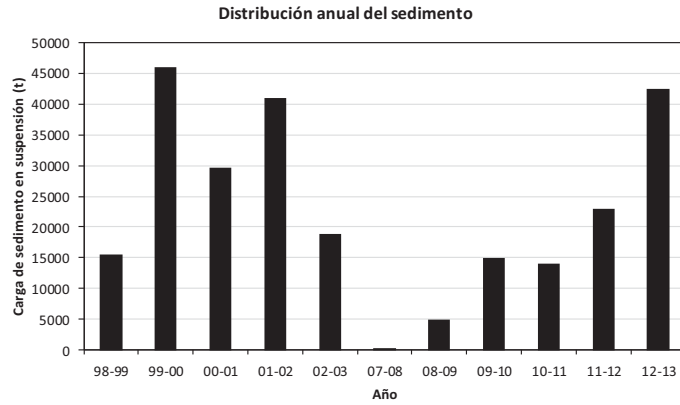
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 12 Sarapiquí  
Estación 11 San Miguel

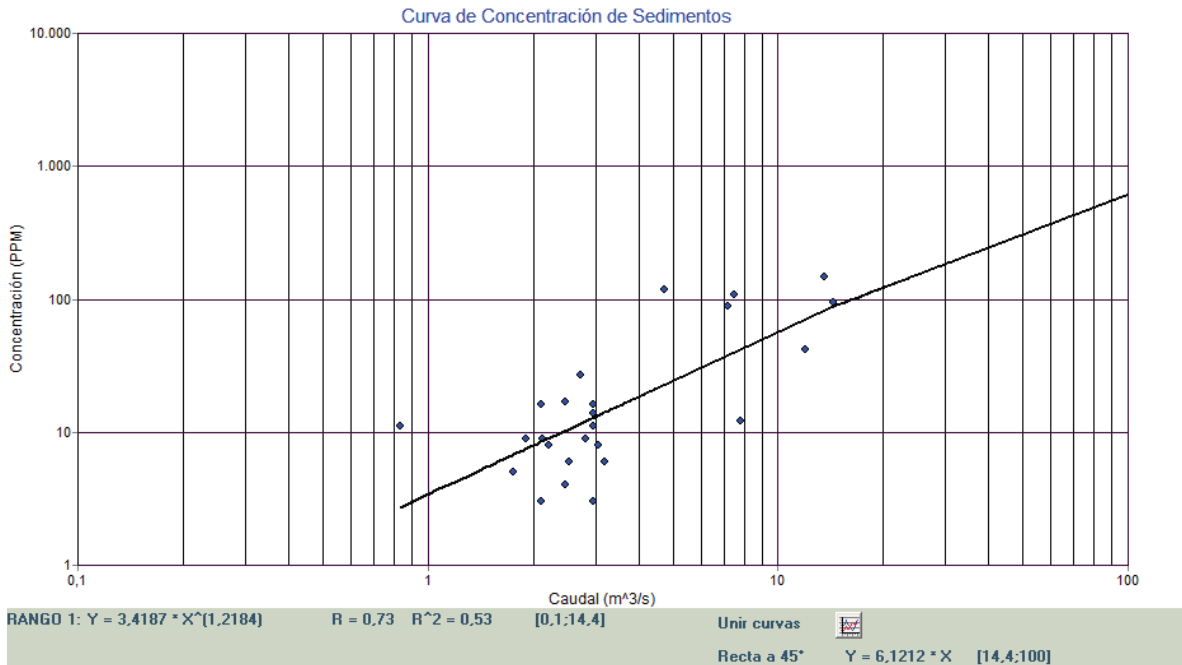
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 47  
Periodo comprendido: 1/7/1998 hasta 12/1/2010

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
98-99	15456	10
99-00	45897	12
00-01	29632	12
01-02	40993	12
02-03	18920	13
07-08	304	6
08-09	5041	10
09-10	14898	11
10-11	13985	10
11-12	22926	9
12-13	42455	15
<b>Promedio</b>	<b>22773</b>	<b>11</b>

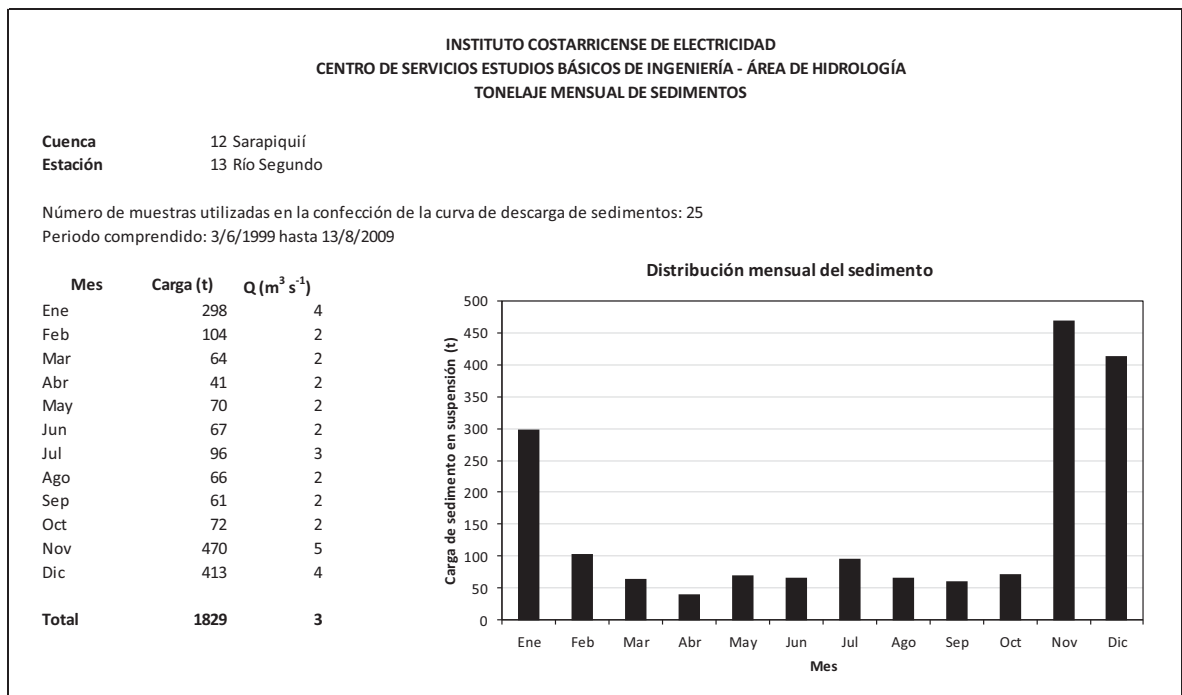


## Station 12-13 Río Segundo

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



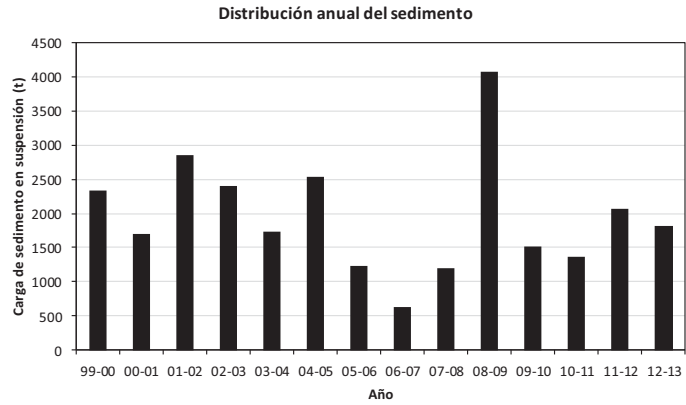
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 12 Sarapiquí  
Estación 13 Río Segundo

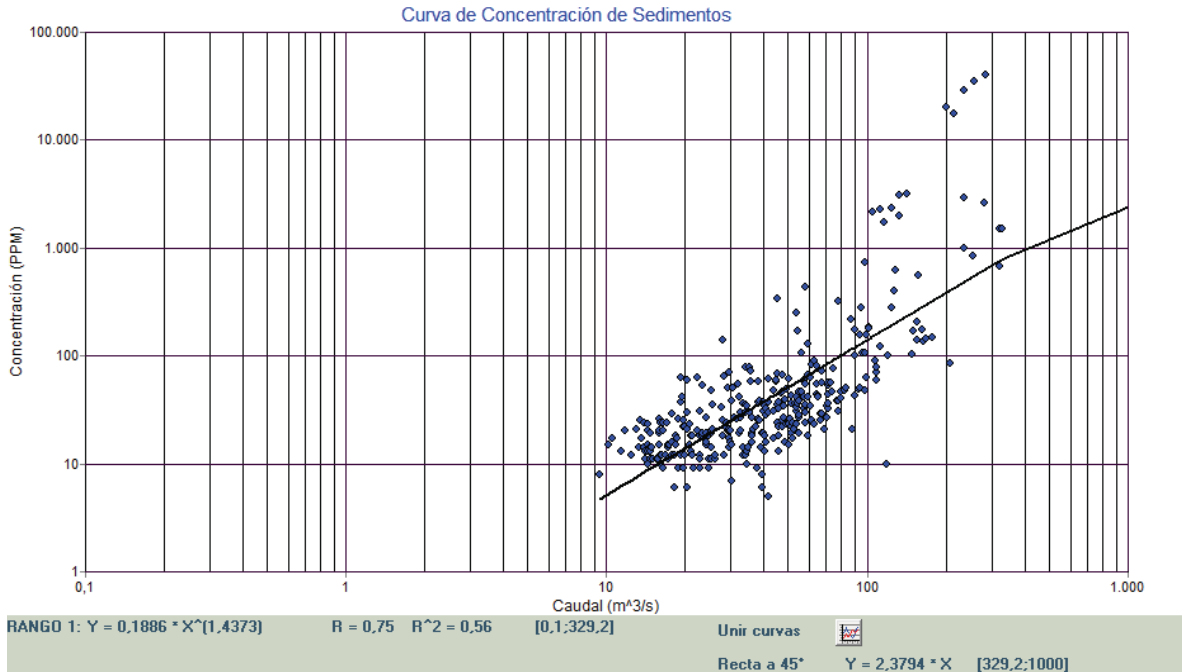
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 25  
Periodo comprendido: 3/6/1999 hasta 13/8/2009

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
99-00	2332	3
00-01	1707	3
01-02	2846	3
02-03	2401	3
03-04	1725	3
04-05	2529	3
05-06	1230	2
06-07	626	2
07-08	1200	2
08-09	4065	3
09-10	1517	2
10-11	1364	2
11-12	2072	2
12-13	1813	2
<b>Promedio</b>	<b>1829</b>	<b>3</b>

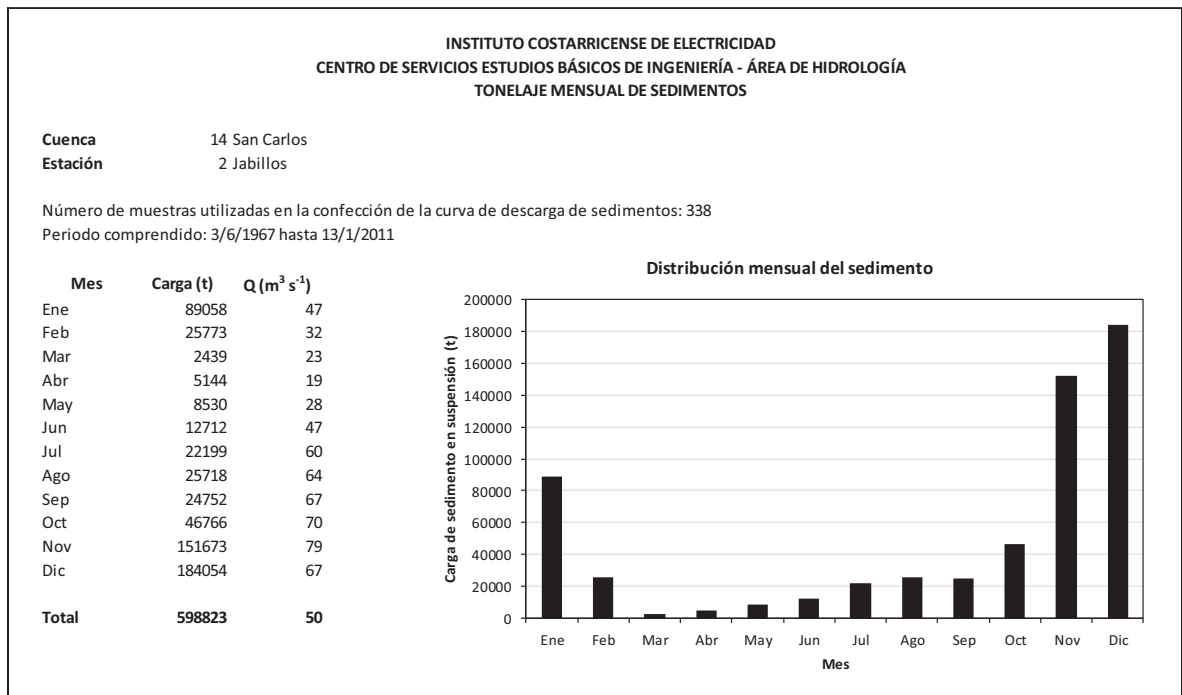


## Station 14-02 Jabillos

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension





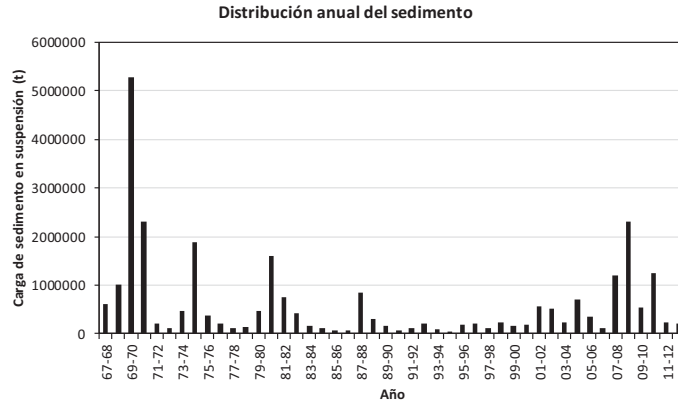
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS**

**Cuenca** 14 San Carlos  
**Estación** 2 Jabillos

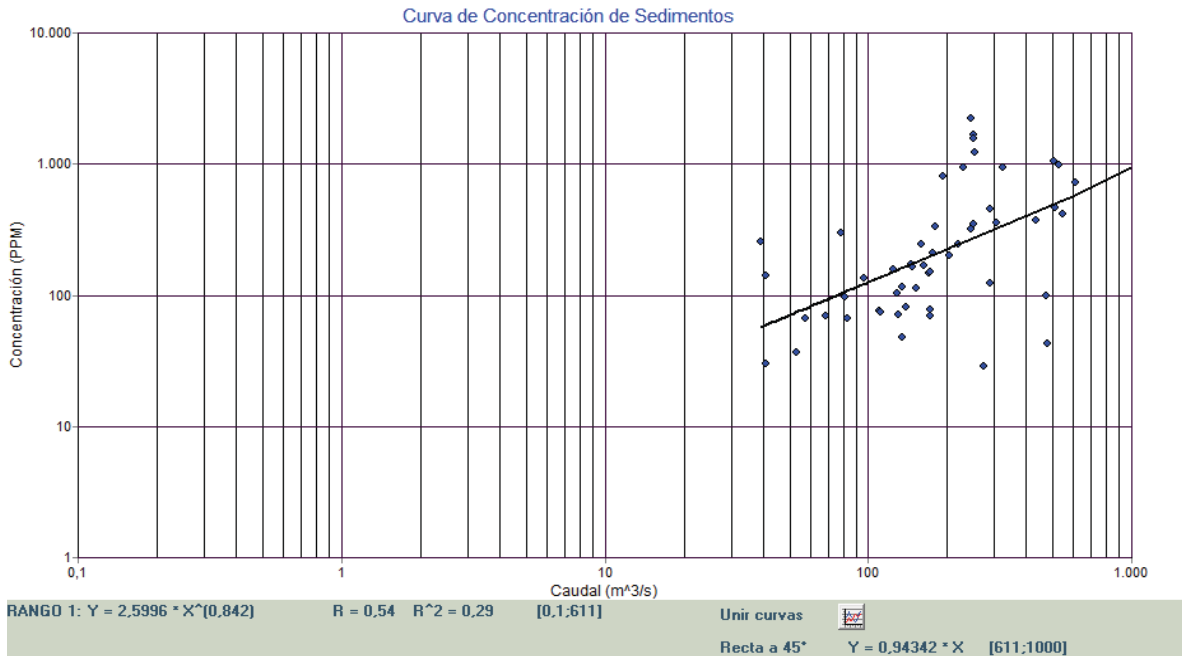
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 338  
Periodo comprendido: 3/6/1967 hasta 13/1/2011

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
67-68	616130	67
68-69	1015699	62
69-70	5283115	82
70-71	2308064	84
71-72	208463	50
72-73	119209	42
73-74	468902	57
74-75	1871807	54
75-76	385737	49
76-77	217122	47
77-78	112533	39
78-79	133496	45
79-80	477245	47
80-81	1590355	60
81-82	750198	60
82-83	428370	50
83-84	153825	42
84-85	123983	42
85-86	74392	37
86-87	75879	38
87-88	835364	47
88-89	310685	47
89-90	156424	45
90-91	70127	38
91-92	117729	41
92-93	204789	40
93-94	91077	38
94-95	51059	32
95-96	186980	45
96-97	202424	52
97-98	107535	44
98-99	231787	46
99-00	151865	44
00-01	196634	51
01-02	557392	55
02-03	526224	53
03-04	228556	57
04-05	699629	63
05-06	360034	48
06-07	126925	44
07-08	1204812	59
08-09	2312645	79
09-10	531934	53
10-11	1235213	65
11-12	230574	39
12-13	202933	42
<b>Promedio</b>	<b>598823</b>	<b>50</b>

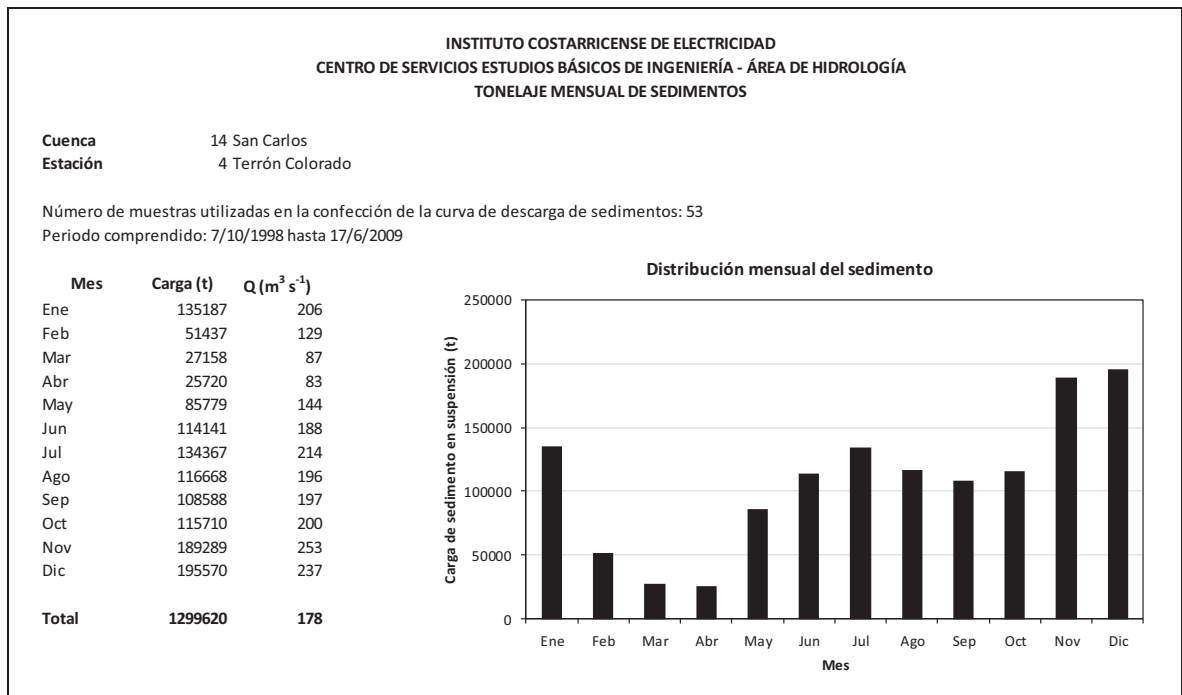


## Station 14-04 Terrón Colorado

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



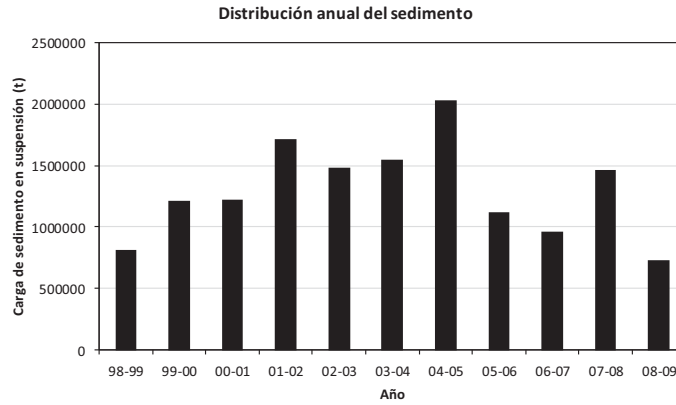
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 14 San Carlos  
Estación 4 Terrón Colorado

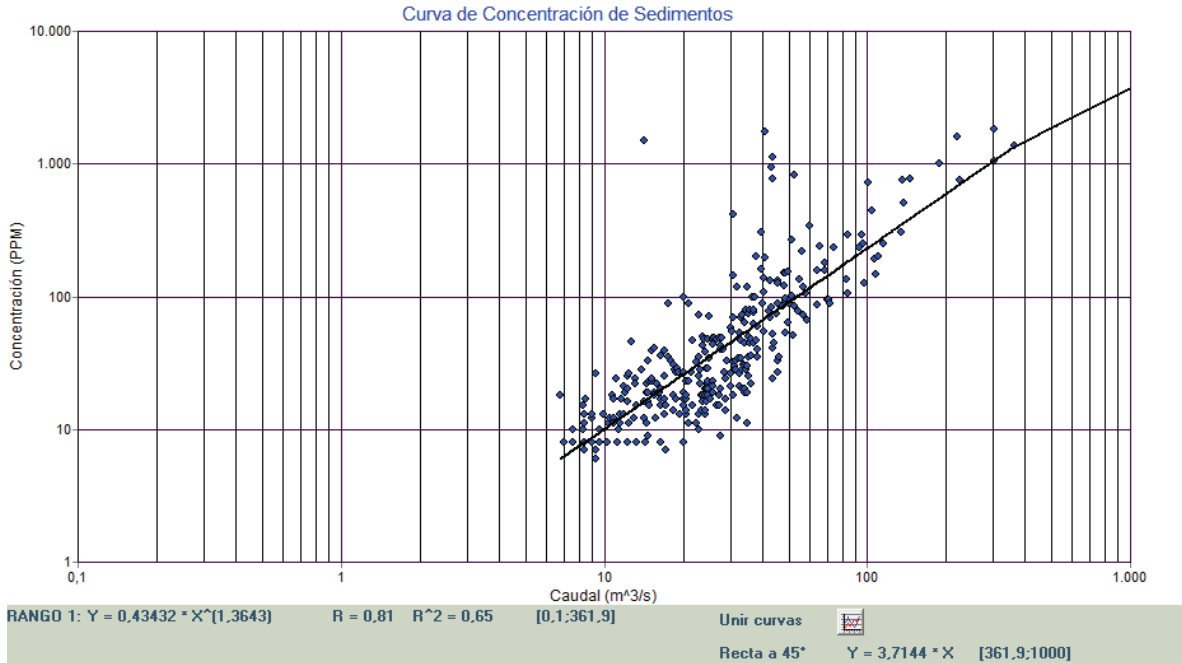
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 53  
Periodo comprendido: 7/10/1998 hasta 17/6/2009

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
98-99	813368	167
99-00	1211918	161
00-01	1218509	166
01-02	1714428	187
02-03	1486594	173
03-04	1544806	193
04-05	2028312	213
05-06	1119198	153
06-07	961905	145
07-08	1462592	199
08-09	734184	213
<b>Promedio</b>	<b>1299619</b>	<b>179</b>

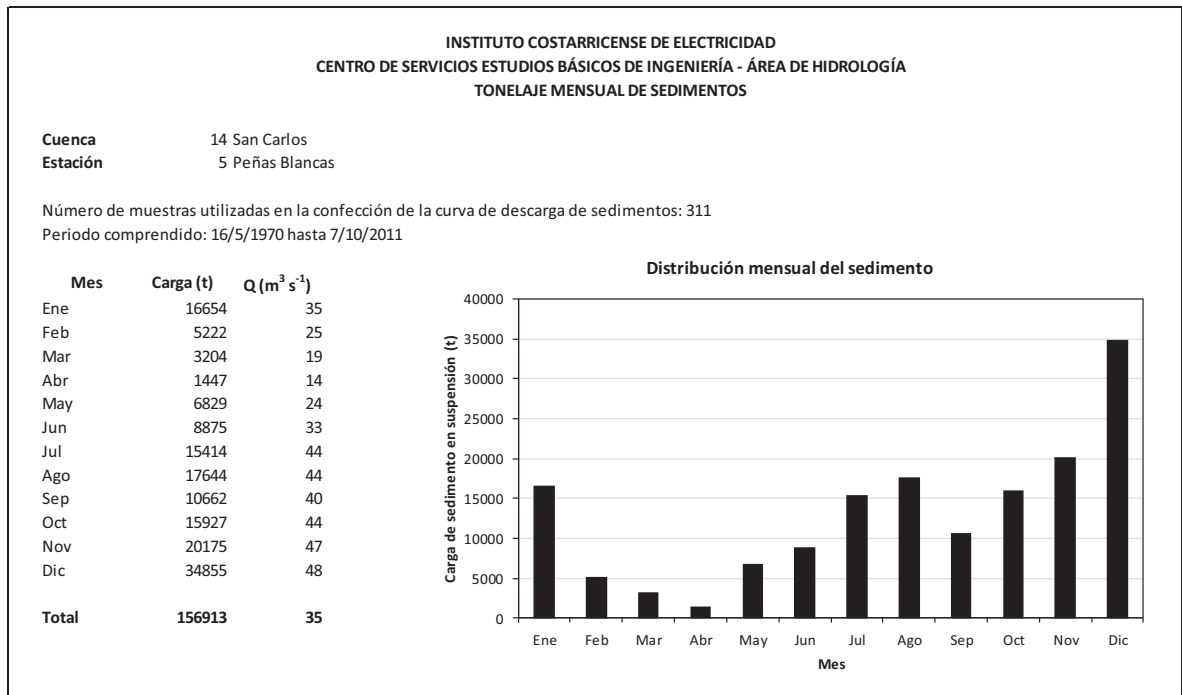


## Station 14-05 Peñas Blancas

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



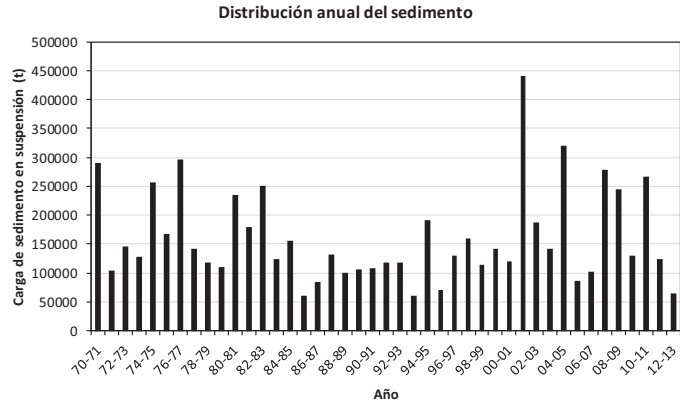
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 14 San Carlos  
Estación 5 Peñas Blancas

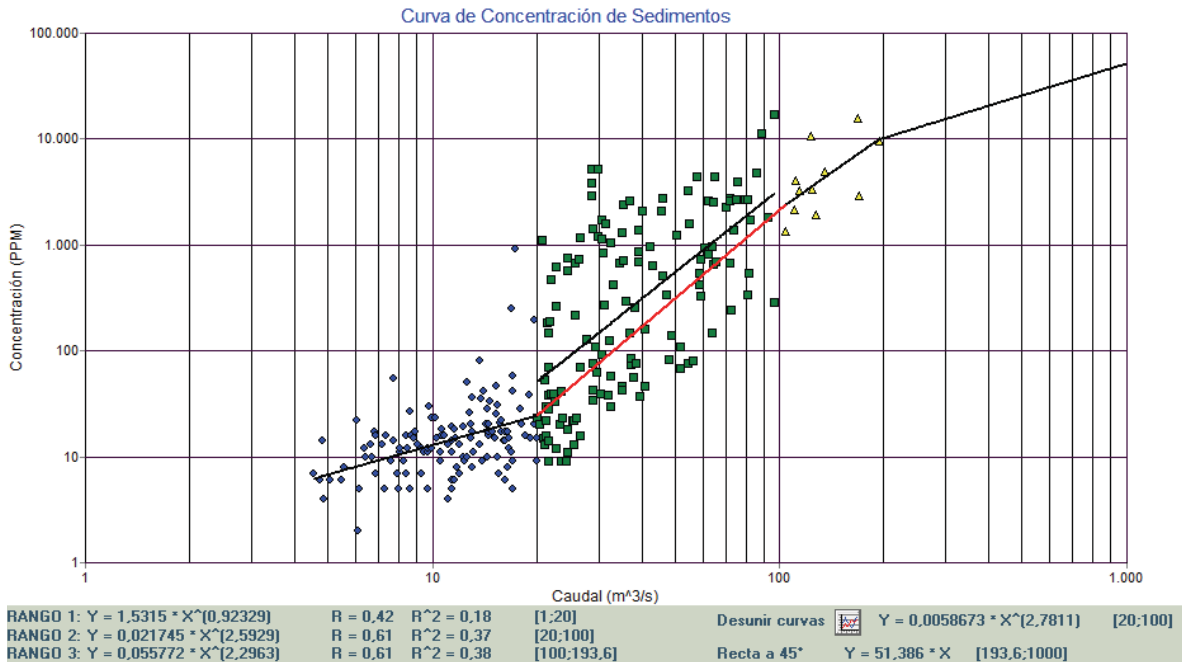
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 311  
Período comprendido: 16/5/1970 hasta 7/10/2011

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
70-71	290658	51
71-72	104112	32
72-73	145208	37
73-74	127335	35
74-75	256882	36
75-76	167037	34
76-77	296474	41
77-78	142675	36
78-79	117350	32
79-80	109417	33
80-81	234097	40
81-82	179599	36
82-83	250163	39
83-84	124303	31
84-85	155343	35
85-86	60047	25
86-87	83526	29
87-88	132790	33
88-89	100262	31
89-90	106514	34
90-91	108187	33
91-92	118663	34
92-93	118048	31
93-94	59954	25
94-95	191928	30
95-96	70393	28
96-97	130684	35
97-98	158647	34
98-99	113892	32
99-00	141428	35
00-01	119728	36
01-02	441574	44
02-03	186499	38
03-04	141442	39
04-05	320183	47
05-06	87094	27
06-07	102228	29
07-08	278406	35
08-09	245858	42
09-10	130313	35
10-11	266360	36
11-12	123229	32
12-13	65387	25
<b>Promedio</b>	<b>156913</b>	<b>34</b>

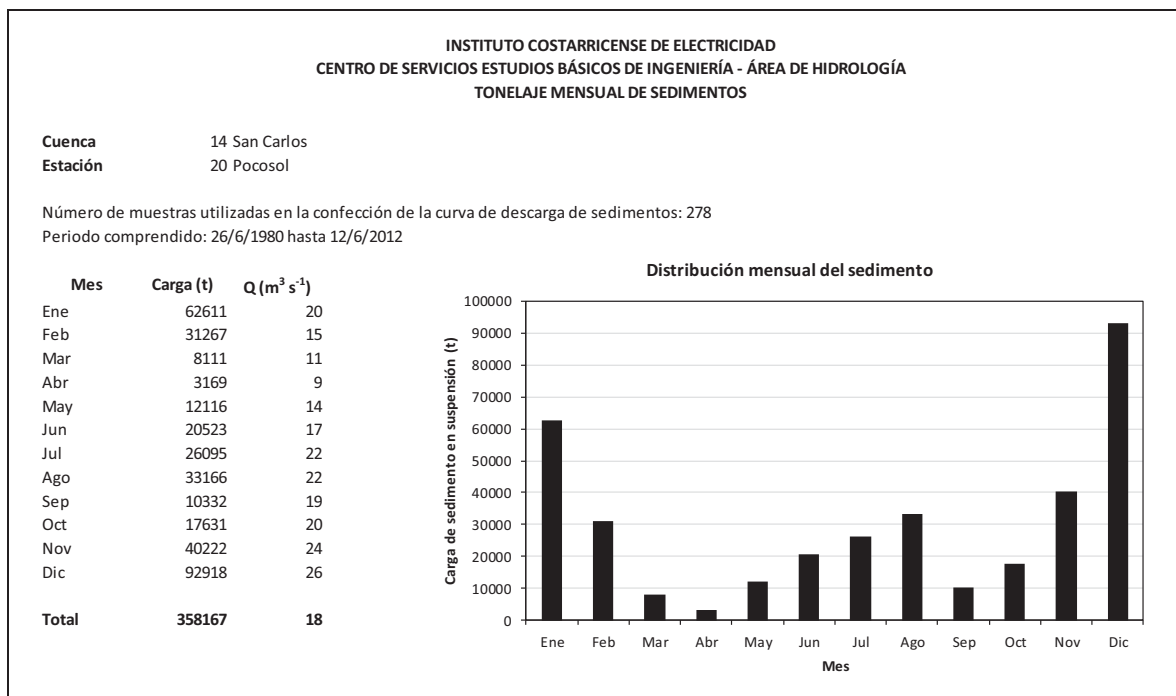


## Station 14-20 Pocosol

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension





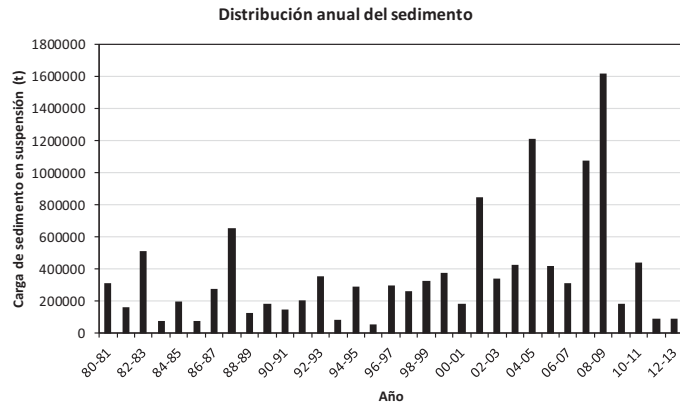
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS

Cuenca 14 San Carlos  
Estación 20 Pocosol

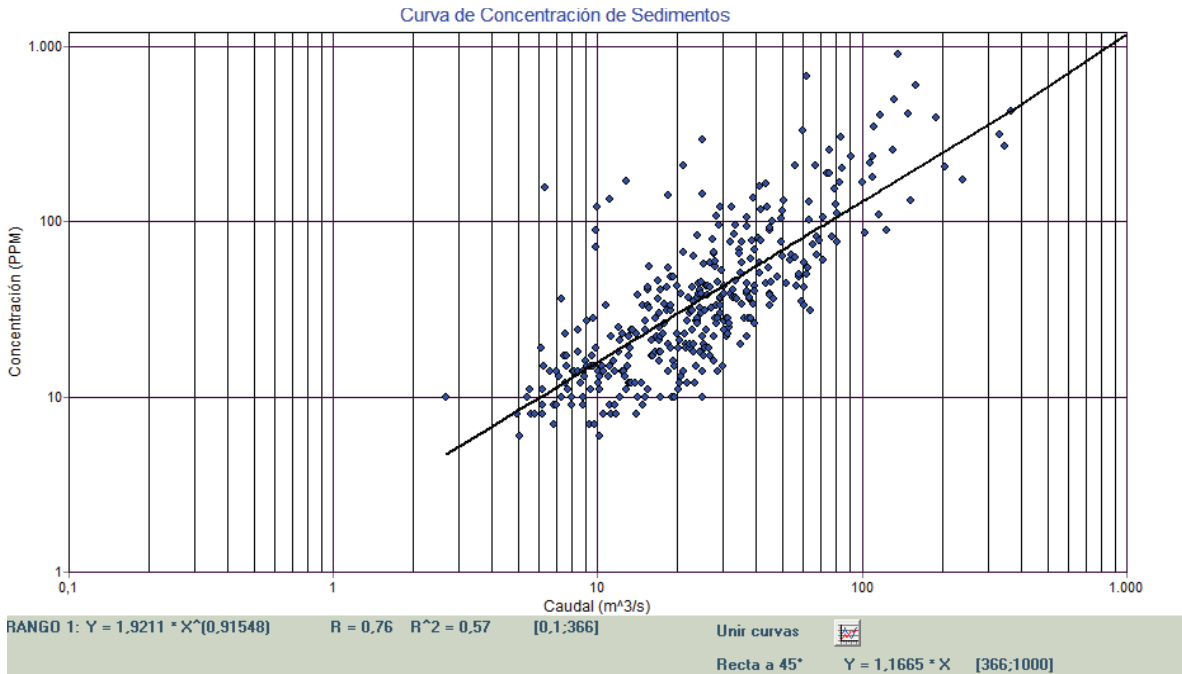
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 278  
Período comprendido: 26/6/1980 hasta 12/6/2012

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
80-81	313027	22
81-82	159535	16
82-83	511584	19
83-84	77552	15
84-85	195022	18
85-86	76084	14
86-87	274232	22
87-88	653666	24
88-89	122636	15
89-90	185292	20
90-91	145057	16
91-92	202426	19
92-93	354275	17
93-94	81885	14
94-95	286548	16
95-96	56400	15
96-97	293749	21
97-98	260690	19
98-99	325477	19
99-00	374098	19
00-01	182818	20
01-02	848782	22
02-03	339358	21
03-04	422327	22
04-05	1209970	26
05-06	418707	16
06-07	310625	18
07-08	1076581	20
08-09	1617471	29
09-10	184318	18
10-11	442155	8
11-12	88132	5
12-13	87117	6
<b>Promedio</b>	<b>358167</b>	<b>17</b>

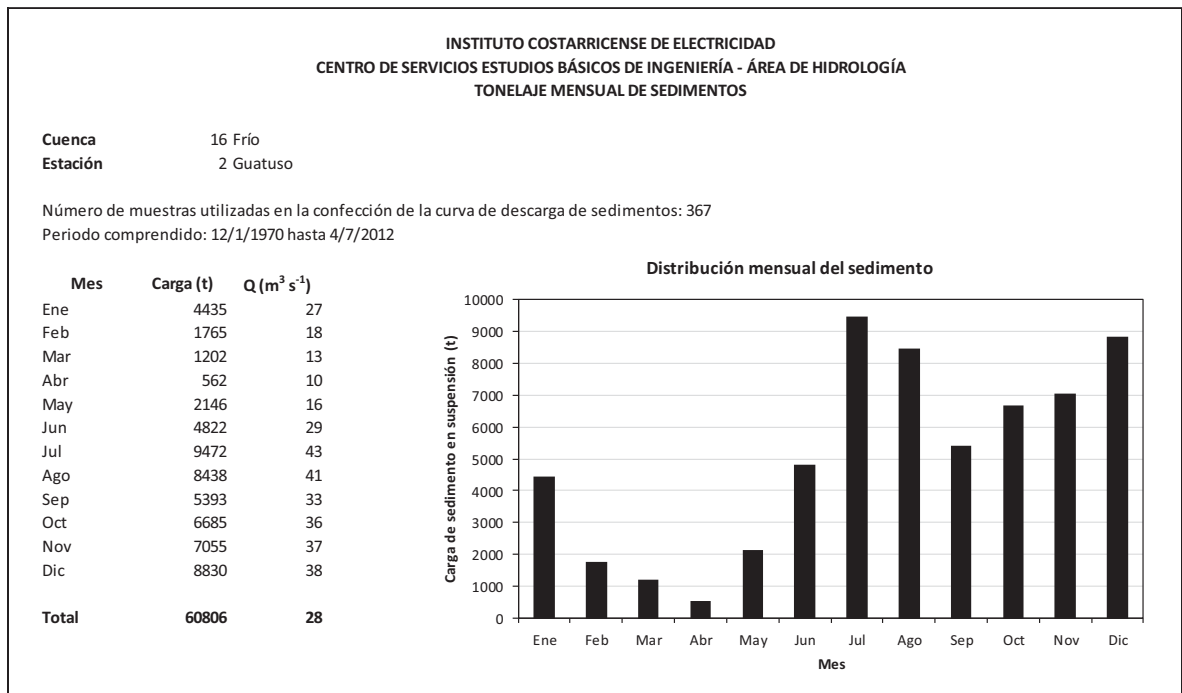


## Station 16-02 Guatuso

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



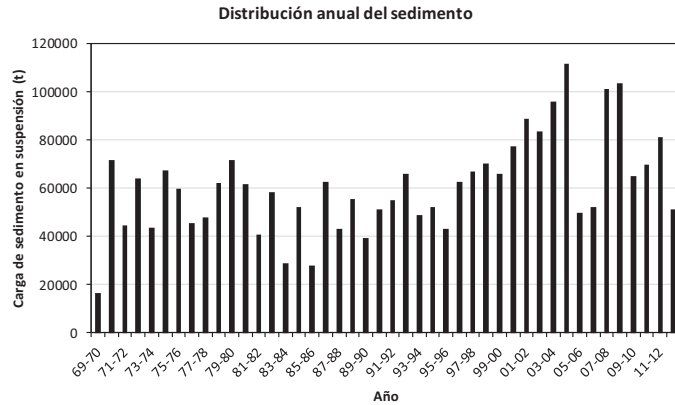
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS**

**Cuenca** 16 Frío  
**Estación** 2 Guatuso

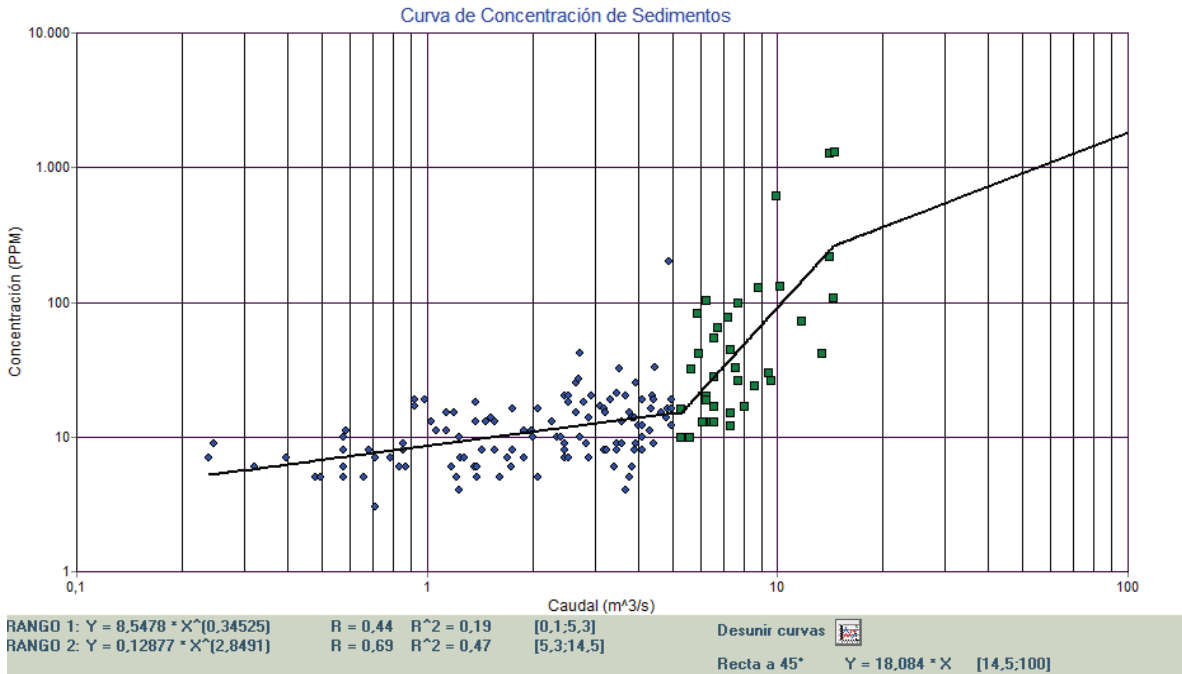
Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 367  
Periodo comprendido: 12/1/1970 hasta 4/7/2012

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
69-70	16236	31
70-71	71851	34
71-72	44505	25
72-73	64070	30
73-74	43699	26
74-75	67458	28
75-76	59628	27
76-77	45541	26
77-78	48025	25
78-79	62214	29
79-80	71481	30
80-81	61661	31
81-82	40723	25
82-83	58405	27
83-84	28748	20
84-85	51927	27
85-86	27825	20
86-87	62535	28
87-88	43039	24
88-89	55462	27
89-90	39488	23
90-91	51045	24
91-92	54758	27
92-93	66142	28
93-94	48830	25
94-95	51894	25
95-96	43141	24
96-97	62661	31
97-98	66784	27
98-99	70259	30
99-00	65739	31
00-01	77523	35
01-02	88779	32
02-03	83577	32
03-04	95682	36
04-05	111367	40
05-06	49533	26
06-07	51998	24
07-08	100959	34
08-09	103435	38
09-10	64819	28
10-11	69750	30
11-12	81131	32
12-13	51139	32
<b>Promedio</b>	<b>60806</b>	<b>29</b>

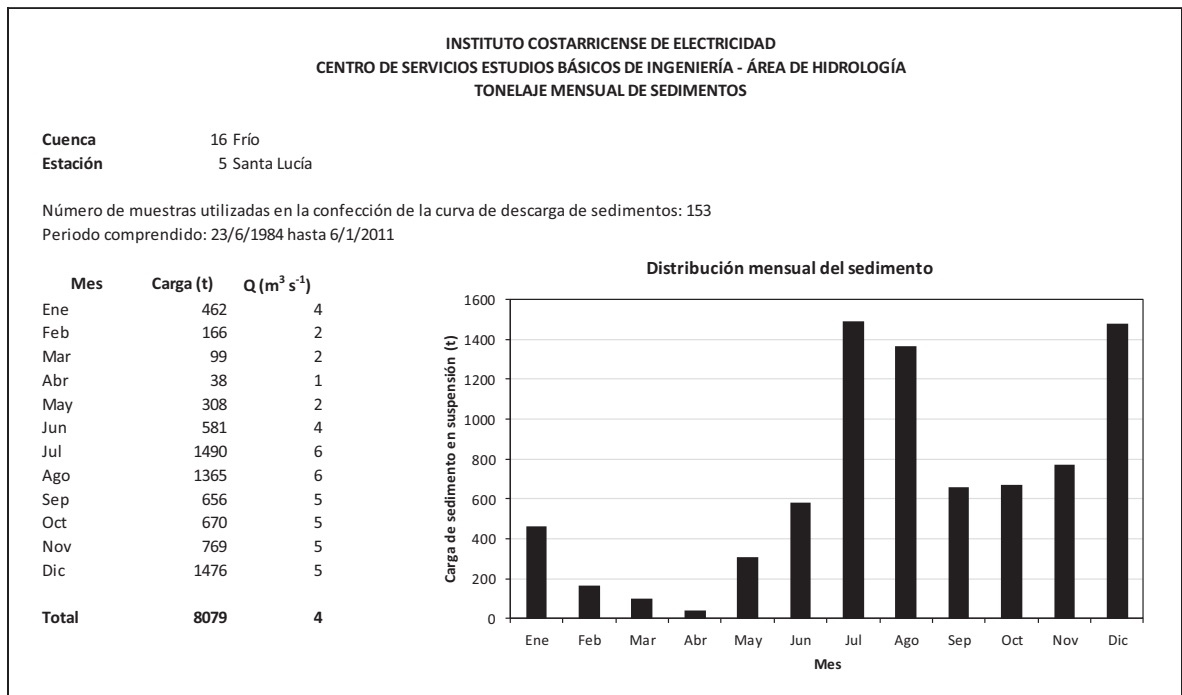


## Station 16-05 Santa Lucía

### Courbe de tarage des sédiments en suspension



### Charge mensuelle moyenne des sédiments en suspension



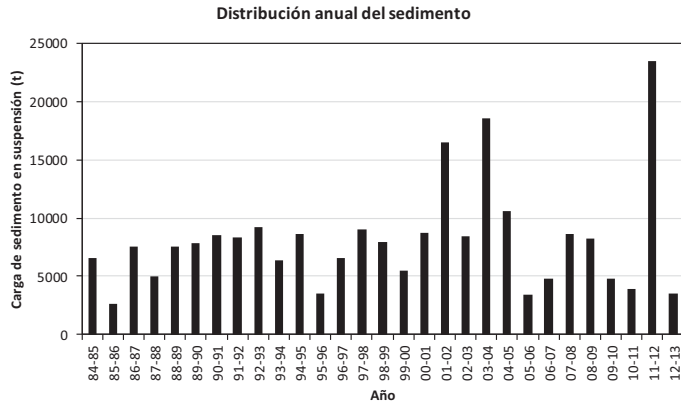
## Charge annuelle moyenne des sédiments en suspension

**INSTITUTO COSTARRICENSE DE ELECTRICIDAD  
CENTRO DE SERVICIOS ESTUDIOS BÁSICOS DE INGENIERÍA - ÁREA DE HIDROLOGÍA  
TONELAJE ANUAL DE SEDIMENTOS**

**Cuenca** 16 Frío  
**Estación** 5 Santa Lucía

Número de muestras utilizadas en la confección de la curva de descarga de sedimentos: 153  
Periodo comprendido: 23/6/1984 hasta 6/1/2011

Año hidro.	Carga (t)	Q (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )
84-85	6530	4
85-86	2618	3
86-87	7596	4
87-88	4963	4
88-89	7526	4
89-90	7881	4
90-91	8502	4
91-92	8352	4
92-93	9212	4
93-94	6335	3
94-95	8667	4
95-96	3504	3
96-97	6567	4
97-98	8976	4
98-99	7964	4
99-00	5505	4
00-01	8696	4
01-02	16480	5
02-03	8473	4
03-04	18505	5
04-05	10628	5
05-06	3387	3
06-07	4801	3
07-08	8673	4
08-09	8285	5
09-10	4764	4
10-11	3938	3
11-12	23425	6
12-13	3546	4
<b>Promedio</b>	<b>8079</b>	<b>4</b>



**APPENDICE B**  
**MESURES DU DÉBIT MENSUEL À L'AIDE D'UN DOPPLER À LA HAUTEUR DE**  
**LA STATION DE JAUGEAGE DELTA COLORADO (11-04)**

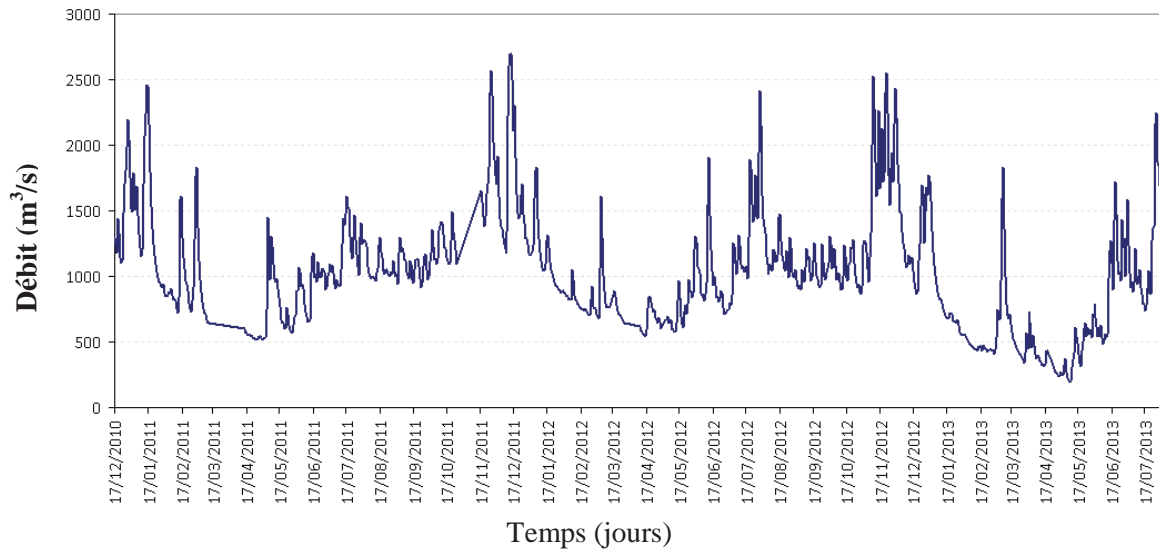
**Tableau B.1.** Mesures (à l'aide d'un doppler) du débit mensuel à la hauteur de la station Delta Colorado (11-04).

Date	Heure	Hauteur des eaux stage (m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)
13/12/2010	14:35	1.59	1430
14/12/2010	09:13	1.96	1650
15/12/2010	10:45	1.74	1490
15/12/2010	15:29	1.63	1440
16/12/2010	10:37	1.49	1350
18/01/2011	16:35	2.04	1720
19/01/2011	09:42	1.75	1540
20/01/2011	09:21	1.32	1360
01/03/2011	15:40	2.09	1660
02/03/2011	09:31	2.36	1980
03/03/2011	12:16	1.47	1360
05/04/2011	09:50	0.25	627
27/04/2011	13:23	0.99	533
01/06/2011	12:29	1.58	817
21/06/2011	09:29	2.07	1120
06/07/2011	15:59	1.72	861
30/07/2011	10:00	2.57	1370
30/08/2011	10:31	1.90	991
22/02/2012	10:46	1.38	685
29/03/2012	10:41	1.23	702
27/06/2012	12:39	1.35	636
01/08/2012	10:45	2.53	1360
29/08/2012	10:37	1.83	923
14/11/2012	10:13	2.91	1650
19/12/2012	9:57	1.68	786
30/01/2013	10:46	1.11	587
06/03/2013	10:51	1.26	668
23/04/2013	10:08	0.70	424
29/05/2013	09:53	2.35	576
26/06/2013	09:18	3.26	1600



APPENDICE C

DÉBIT JOURNALIER À LA HAUTEUR DE LA STATION DE JAUGEAGE DELTA COLORADO (11-04)  
POUR LA PÉRIODE ALLANT DE DÉCEMBRE 2010 À JUILLET 2013



**APPENDICE D**

**ECHANTILLONS DE SÉDIMENTS EN SUSPENSION (SS) PRÉLEVÉS À LA HAUTEUR DES STATIONS DE JAUGEAGE LA TRINIDAD (01-03, ENTRE JANVIER 1974 ET MARS 1976) ET DELTA COLORADO (11-04, ENTRE DÉCEMBRE 2010 ET JUIN 2013)**

**Tableau D.1.** Echantillonnage des sédiments en suspension et du débit à la hauteur de la station de jaugeage La Trinidad (01-03)

Date	Heure	Haut. des eaux (m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)	Concentration en sédiments (mg/l)
09/01/1974	-	1,8	955	177
04/06/1974	-	1,61	861	146
06/11/1974	-	2,34	1230	99
07/12/1974	-	5,52	3100	621
14/01/1975	-	1,42	745	70
05/03/1975	-	1	571	38
25/03/1975	-	0,86	514	38
20/08/1975	-	3,17	1690	203
23/09/1975	-	2,78	1549	213
20/11/1975	-	2,95	1570	176
30/01/1976	-	1,93	979	73
17/03/1976	-	1,28	708	40

**Tableau D.2.** Echantillonnage des sédiments en suspension et du débit à la hauteur de la station de jaugeage Delta Colorado (11-04)

Date	Heure	Haut. des eaux (m)	Débit (en m <sup>3</sup> /s)	Concentration en sédiments (mg/l)
13/12/2010	15:43	1,59	1430	360
16/12/2010	10:05	1,51	1350	227
01/03/2011	16:10	2,07	1660	213
02/03/2011	09:50	2,38	1949	321
02/03/2011	09:59	2,35	1980	262
03/03/2011	13:26	1,46	1356	126
03/03/2011	13:32	1,43	1338	121
05/04/2011	12:26	0,25	627	148
01/06/2011	13:01	1,58	817	138
21/06/2011	09:55	2,12	1120	191
06/07/2011	15:25	1,71	861	129
30/07/2011	11:35	2,56	1370	308
30/08/2011	11:10	1,9	1038	186
05/10/2011	12:25	2,04	1127	177
02/11/2011	10:45	2,97	1691	306
23/11/2011	11:20	3,01	1714	181
04/01/2012	12:10	2,24	1245	117
22/02/2012	11:20	1,39	742	75
29/03/2012	13:10	1,23	647	89
25/04/2012	13:10	1,31	696	89
30/05/2012	13:20	2,47	1407	408
27/06/2012	13:15	1,35	716	80
01/08/2012	11:40	2,53	1420	106
14/11/2012	01:12	2,91	1654	165
19/12/2012	10:35	1,68	909	61
30/01/2013	11:05	1,11	579	87
30/01/2013	11:00	1,11	579	134
06/03/2013	11:45	1,26	664	102
23/04/2013	11:10	0,7	350	91
29/05/2013	10:20	1,05	545	122
26/06/2013	09:45	2,83	1605	229

**APPENDICE E**

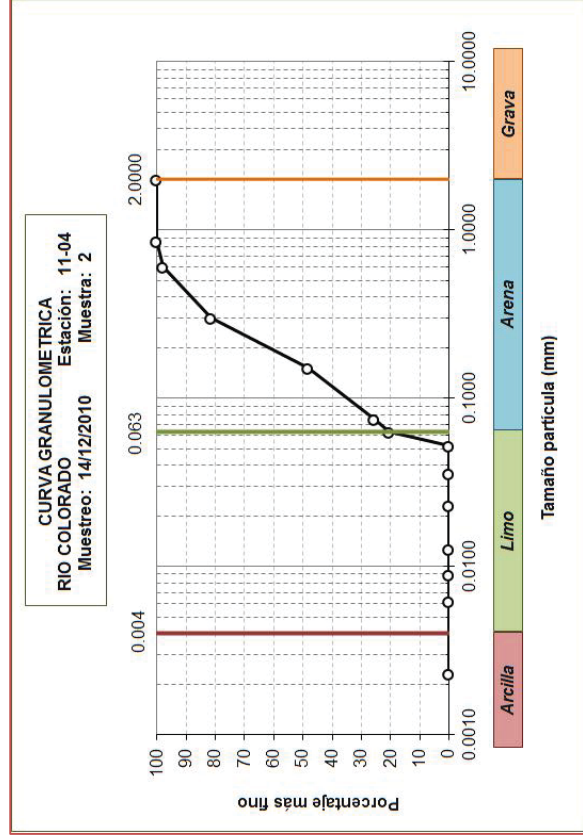
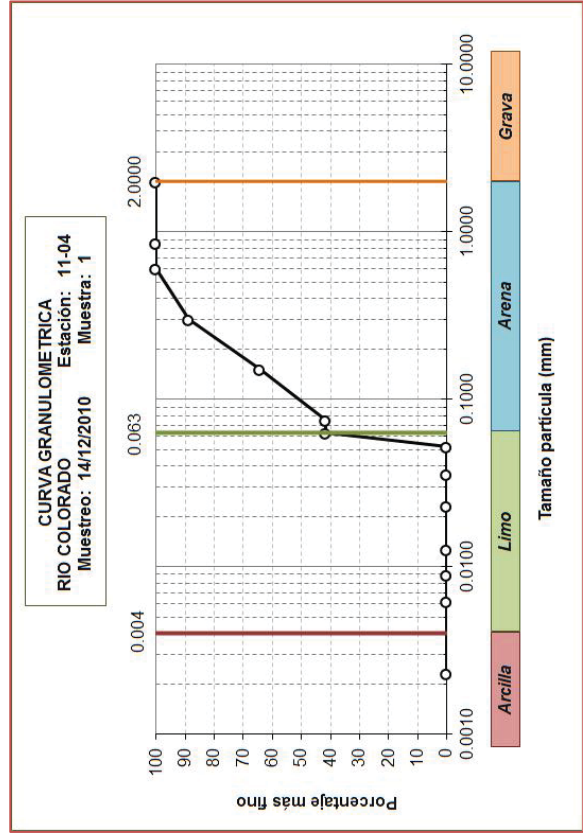
**RÉPARTITION DE LA TAILLE DES PARTICULES POUR LES ÉCHANTILLONS DE LA CHARGE DE FONDS PRÉLEVÉS – SUR UNE BASE MENSUELLE PENDANT LA PÉRIODE ALLANT DE DÉCEMBRE 2010 À JUIN 2013 – AUX EMBOUCHURES DES FLEUVES SAN CARLOS ET SARAPIQUÍ ET À LA HAUTEUR DE LA STATION DELTA COLORADO (11-04)**

# **Charge de fonds : Répartition de la taille des particules**

Station 11-04 Delta Colorado

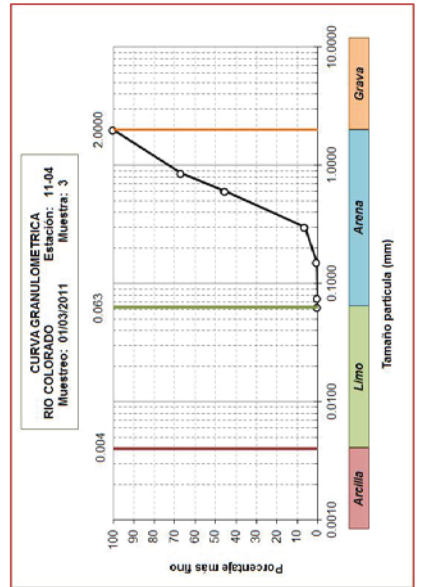
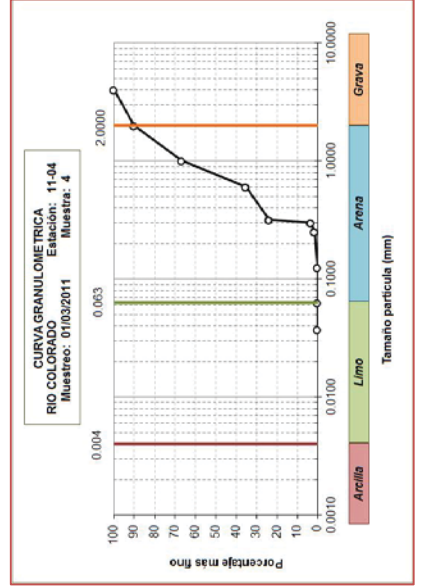
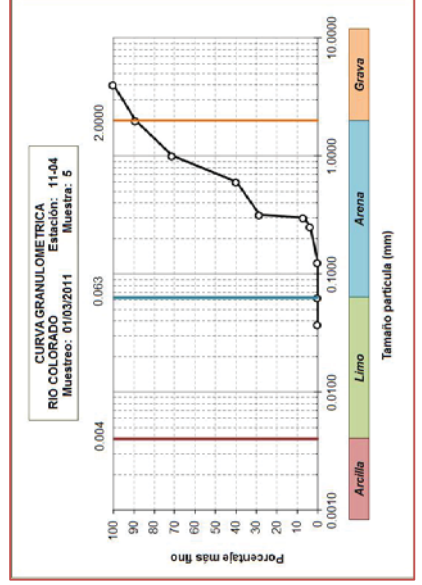
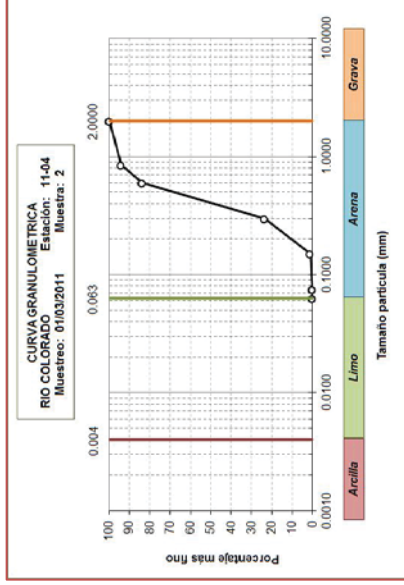
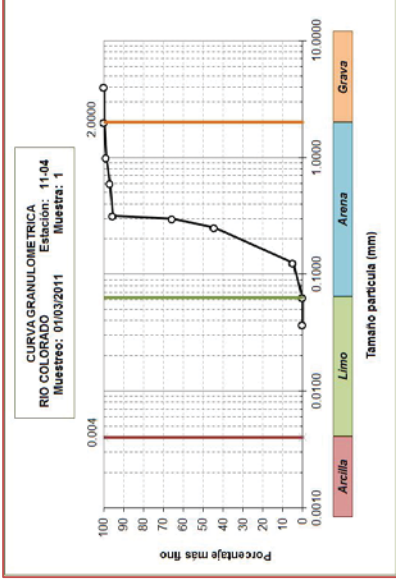
# Station 11-04 Delta Colorado

## 14 décembre 2010



# Station 11-04 Delta Colorado

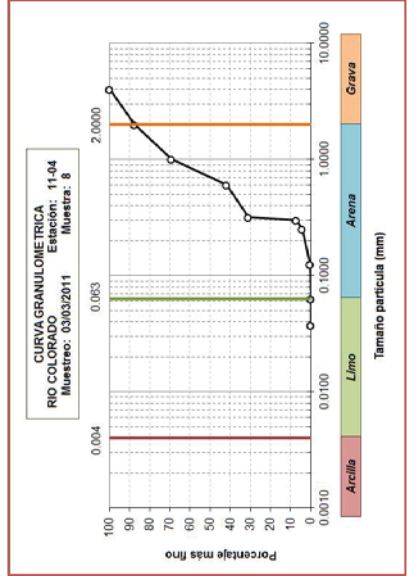
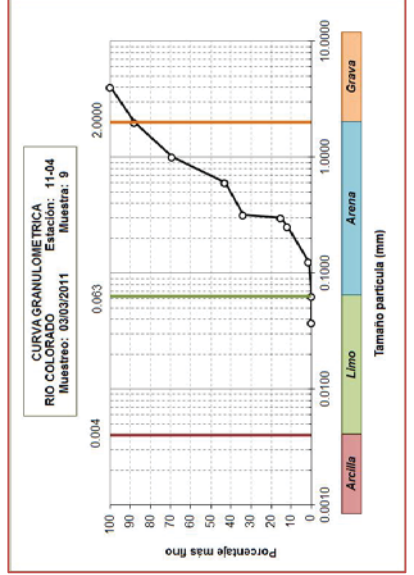
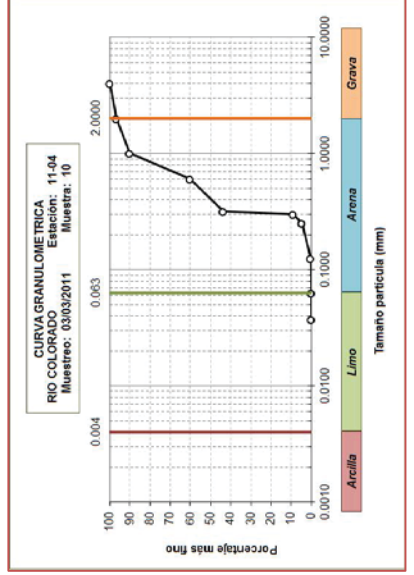
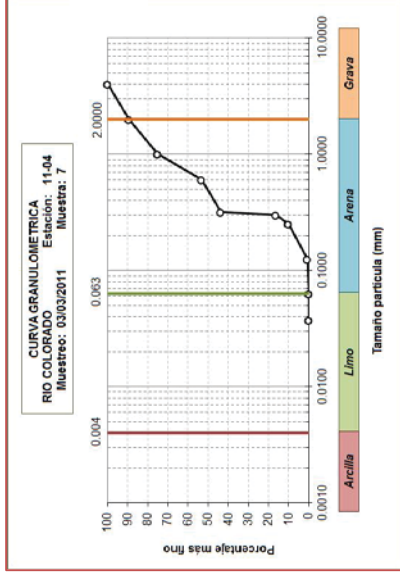
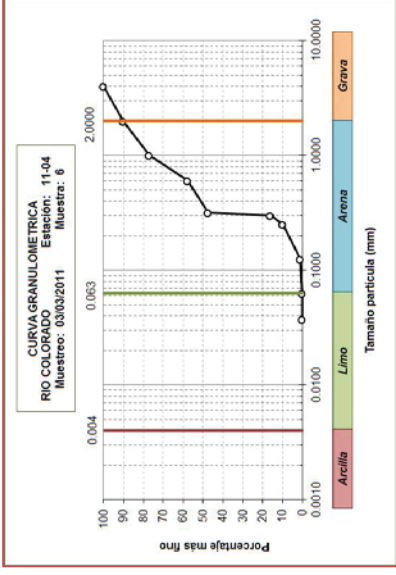
## 1er mars 2011





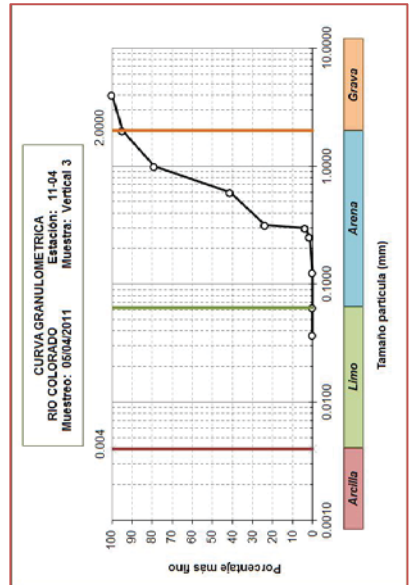
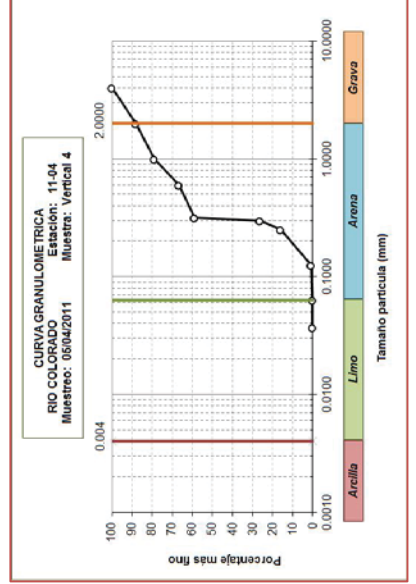
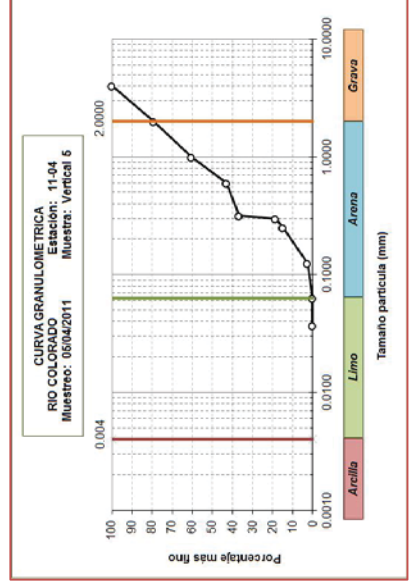
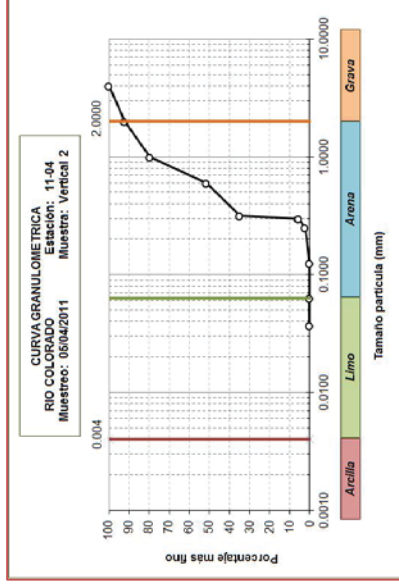
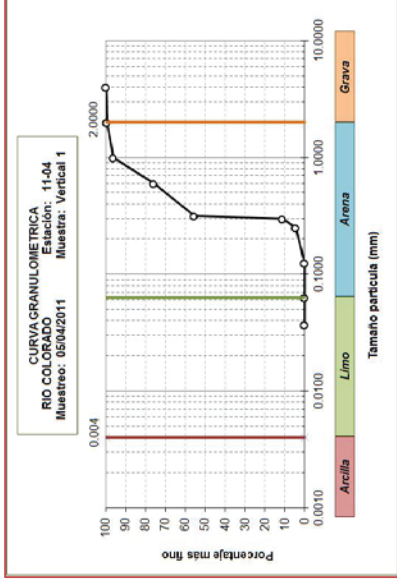
# Station 11-04 Delta Colorado

## 3 mars 2011



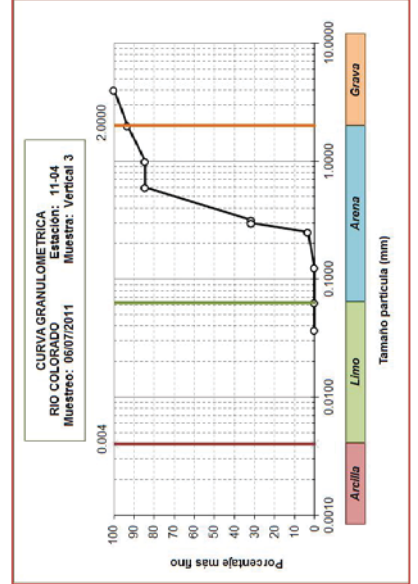
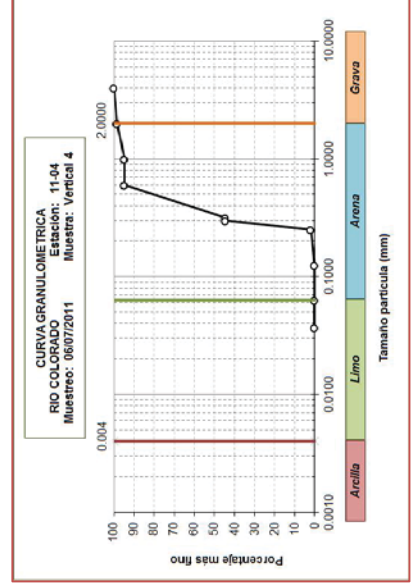
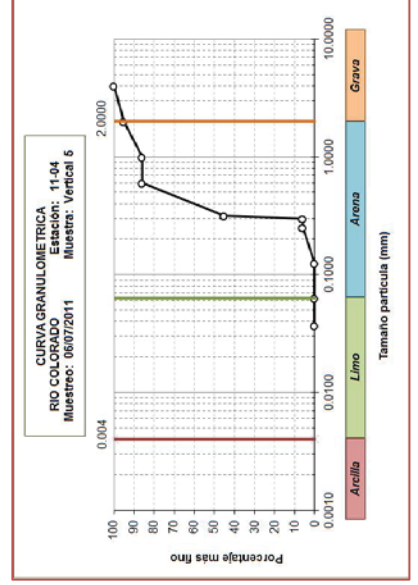
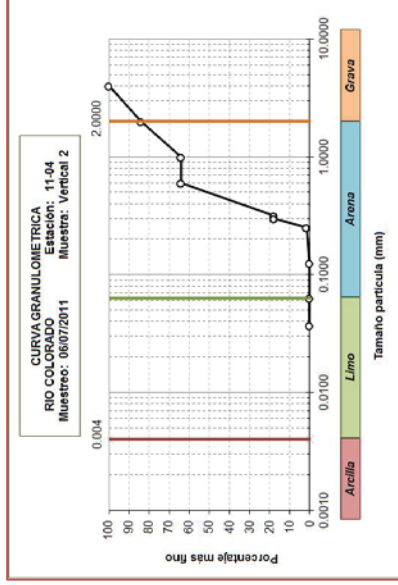
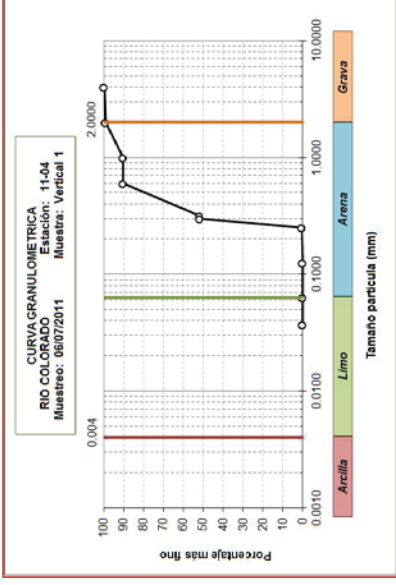
# Station 11-04 Delta Colorado

## 5 abril 2011



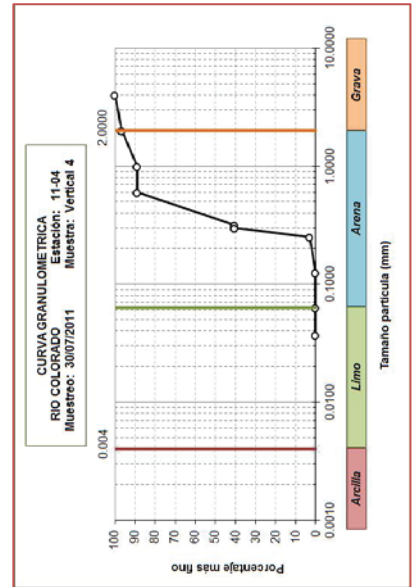
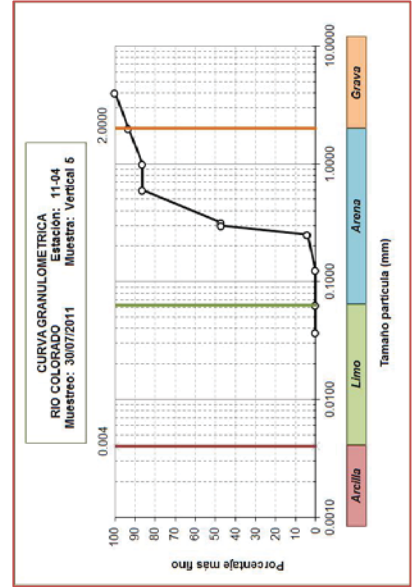
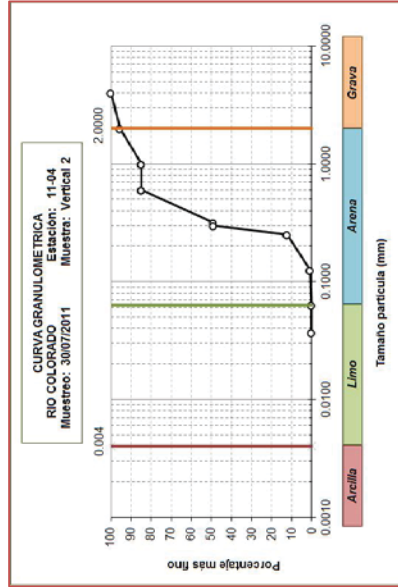
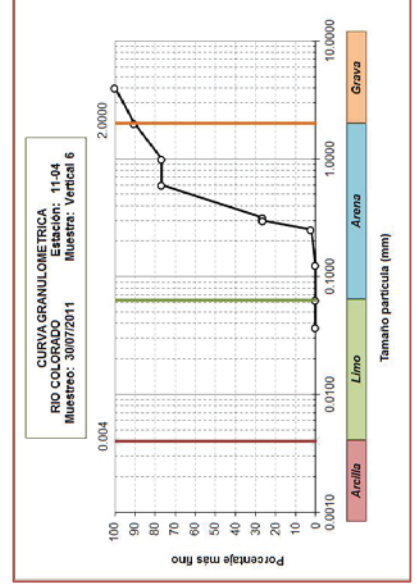
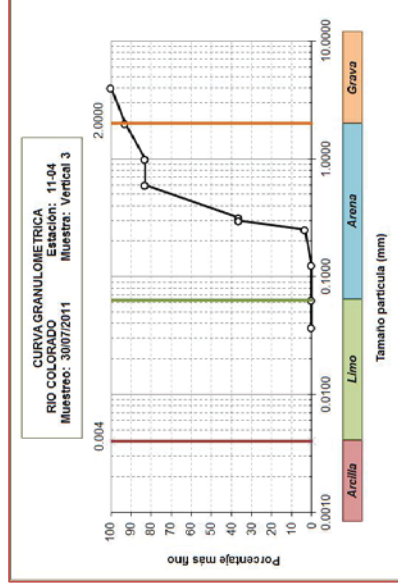
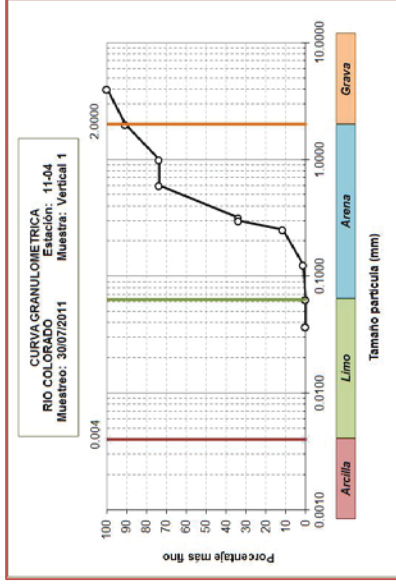
# Station 11-04 Delta Colorado

## 6 juillet 2011



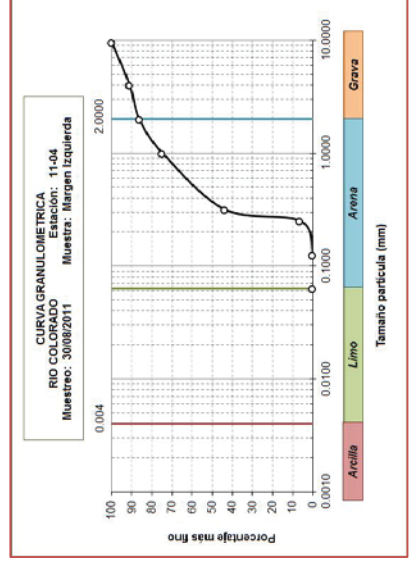
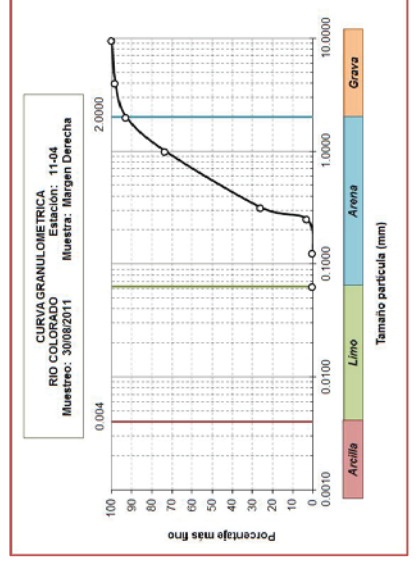
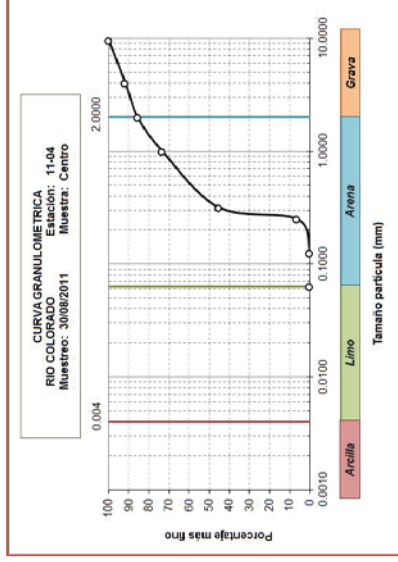
# Station 11-04 Delta Colorado

## 30 juillet 2011



# Station 11-04 Delta Colorado

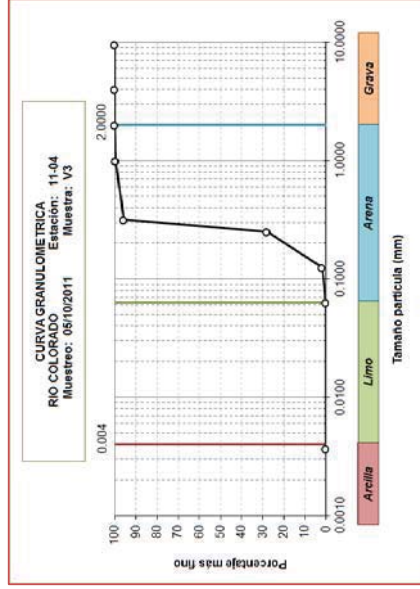
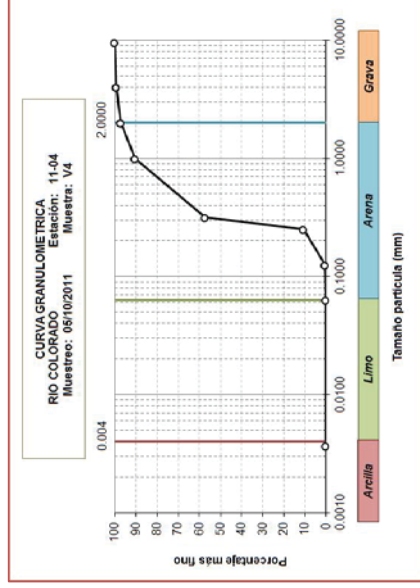
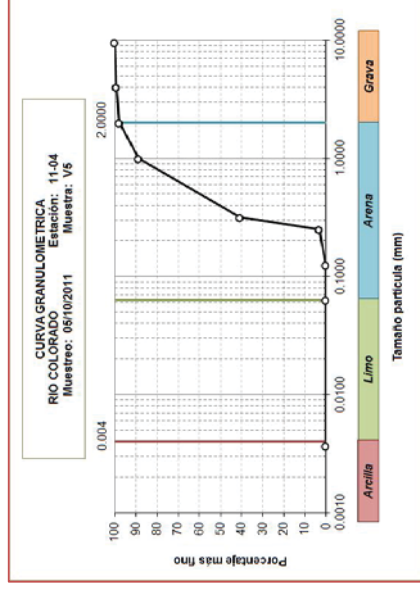
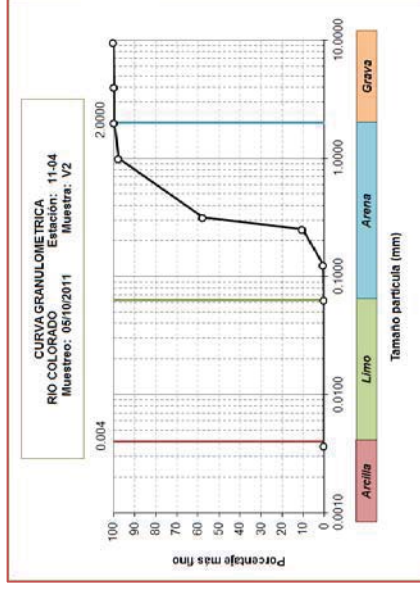
## 30 août 2011





# Station 11-04 Delta Colorado

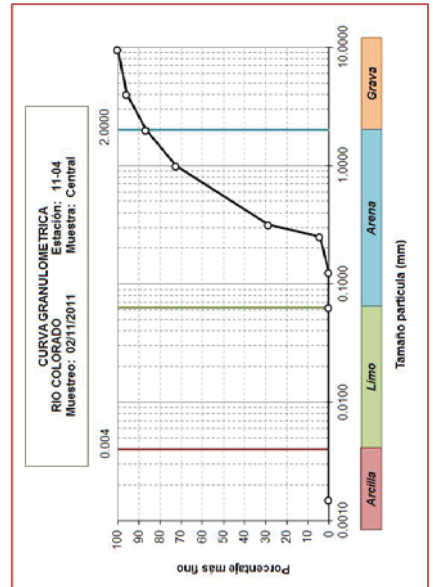
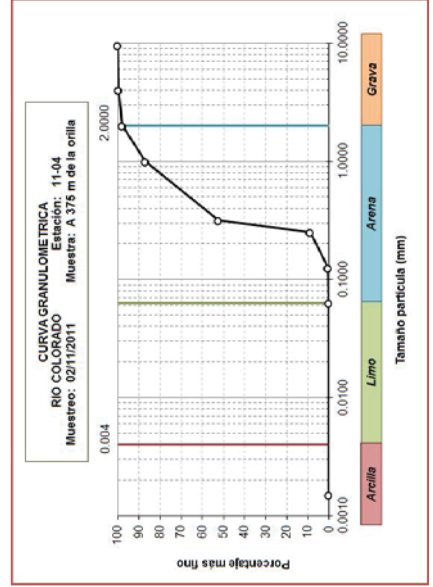
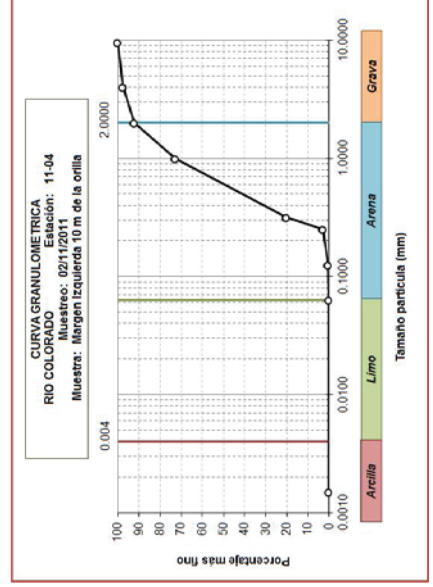
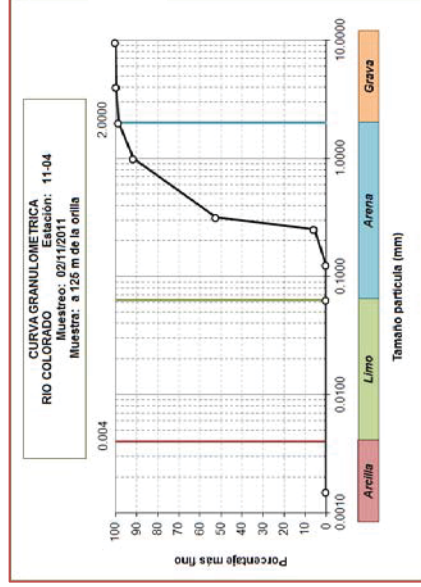
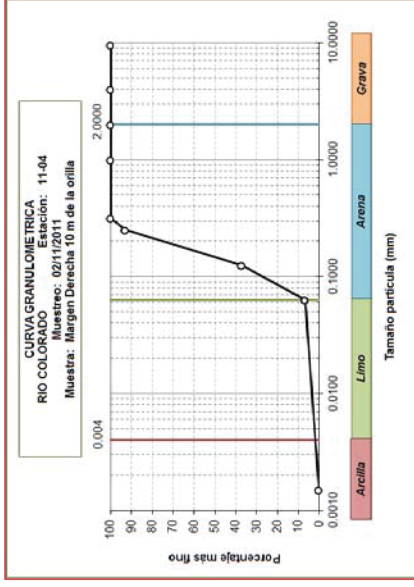
## 5 octubre 2011





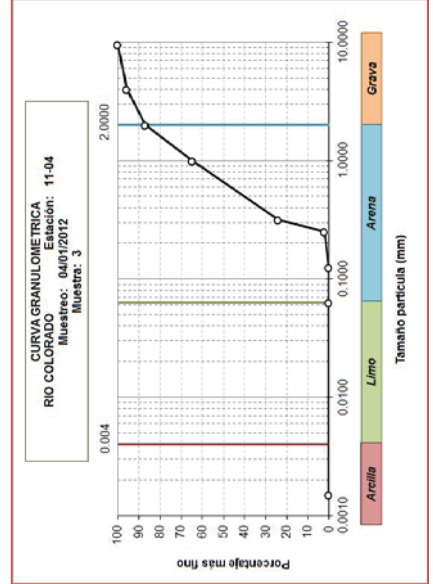
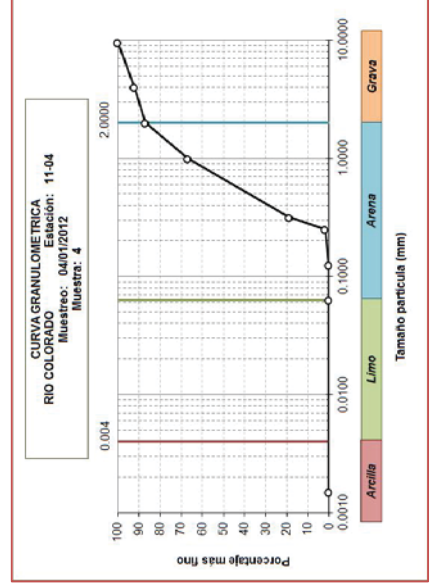
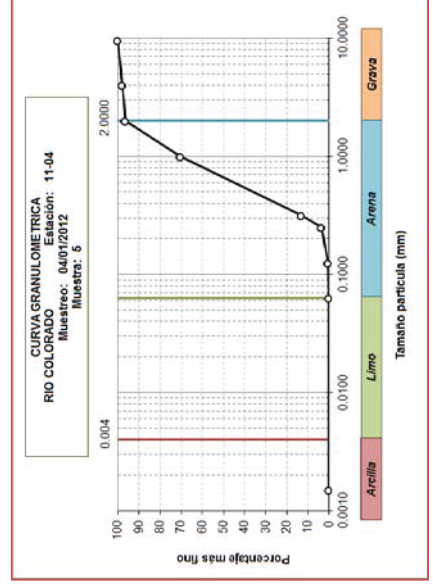
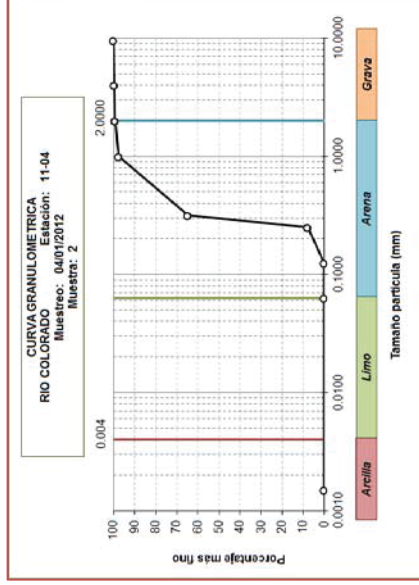
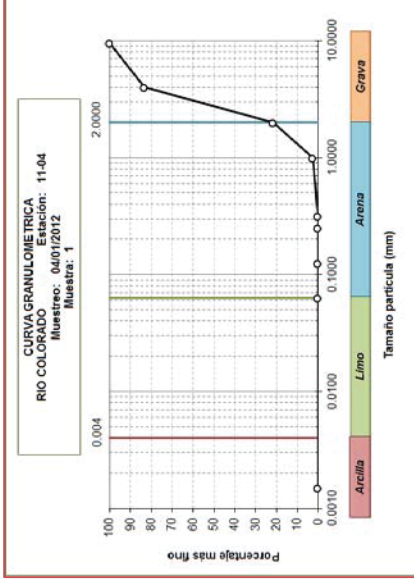
# Station 11-04 Delta Colorado

## 2 novembre 2011



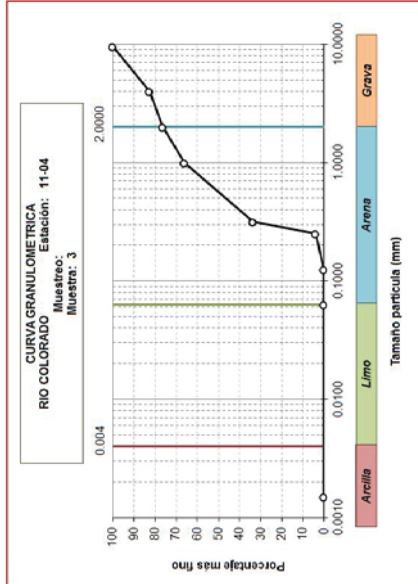
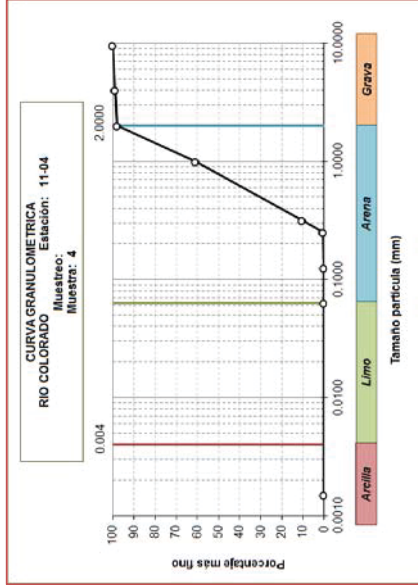
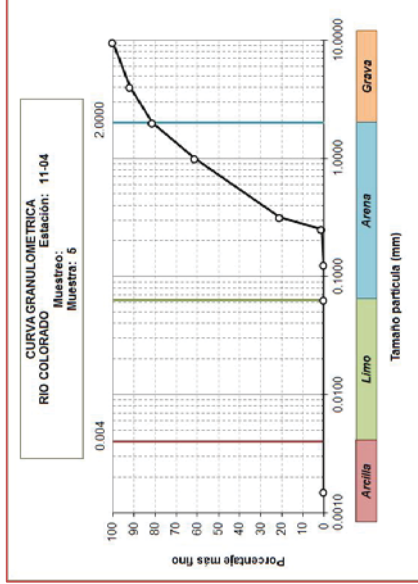
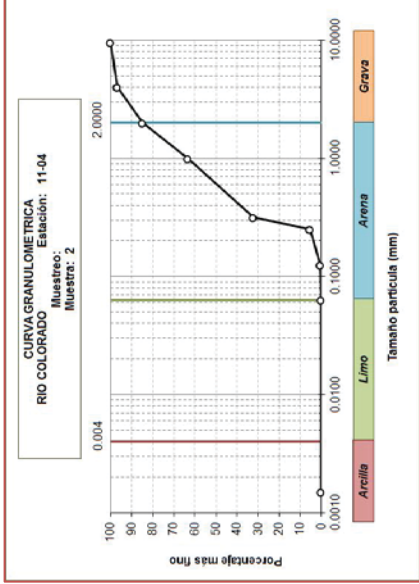
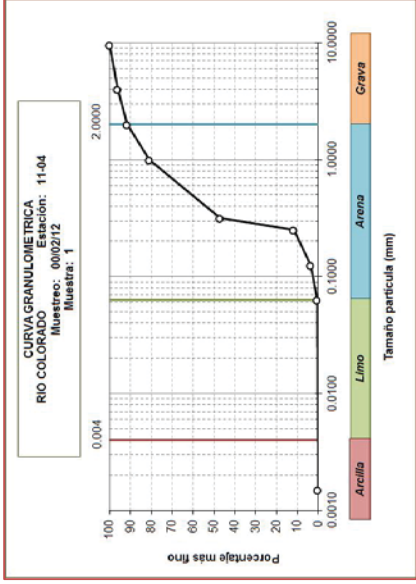
# Station 11-04 Delta Colorado

## 1er janvier 2012



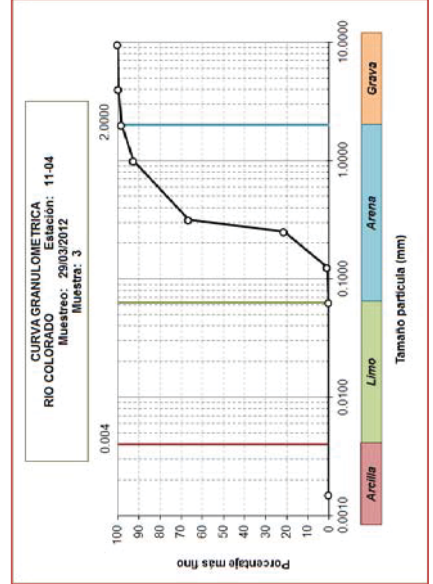
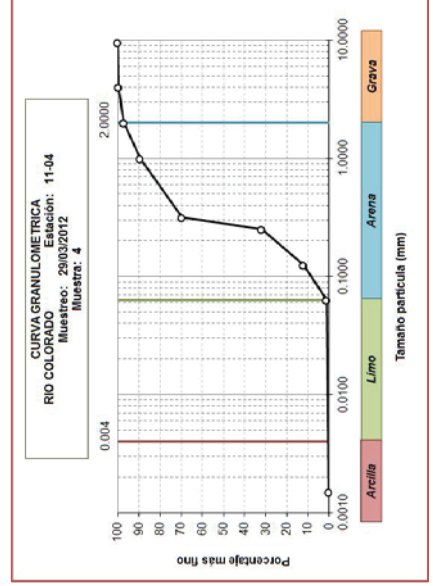
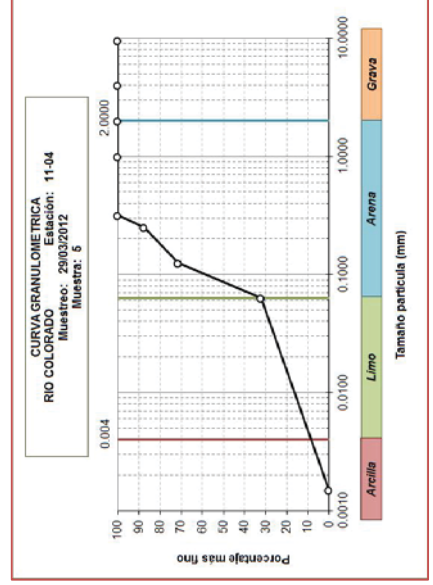
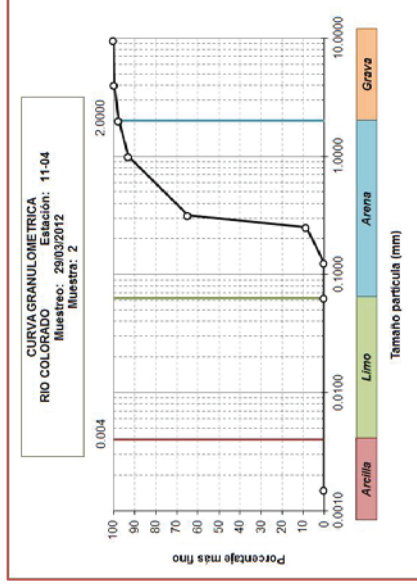
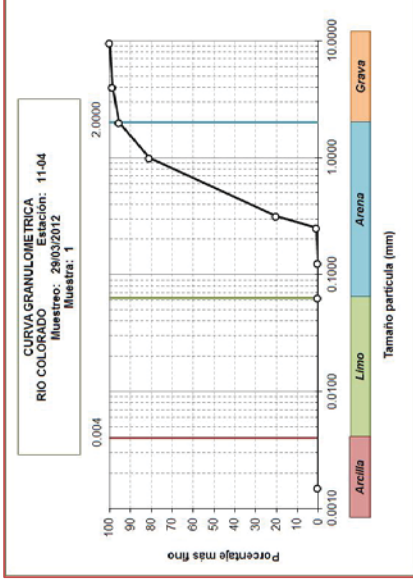
# Station 11-04 Delta Colorado

## 22 février 2012



# Station 11-04 Delta Colorado

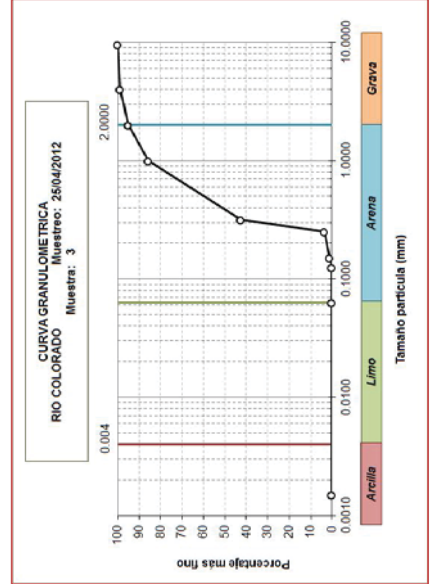
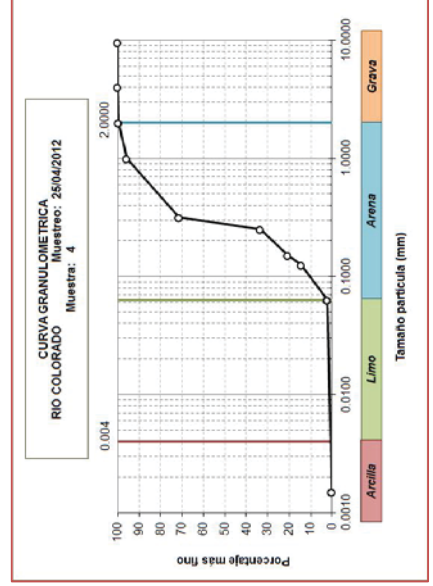
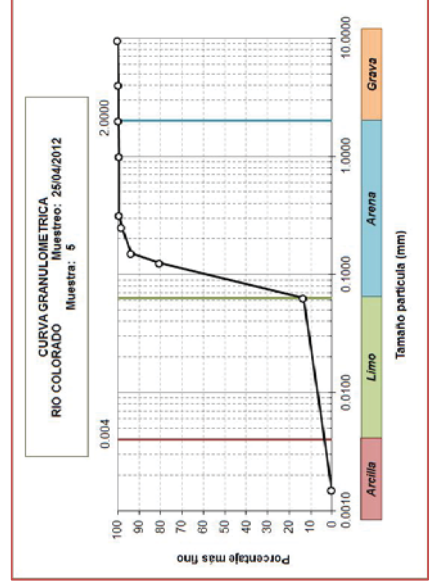
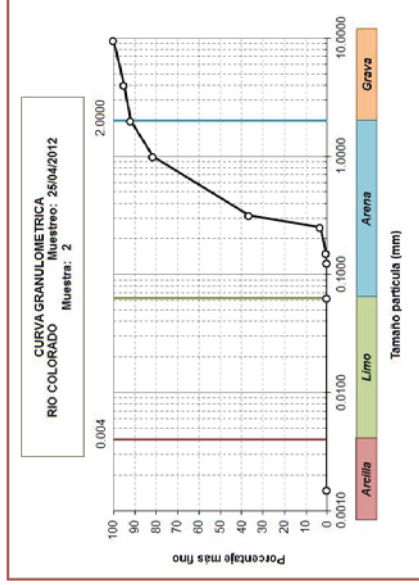
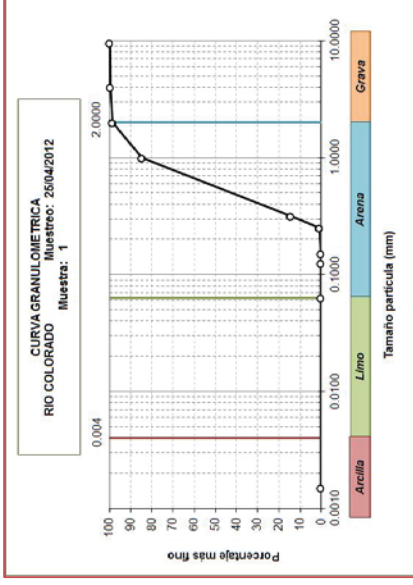
## 29 mars 2012





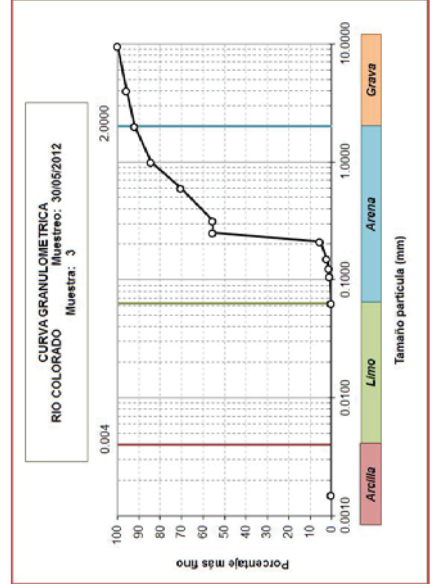
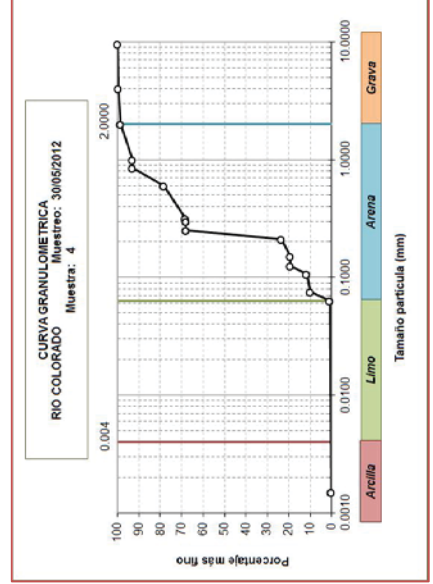
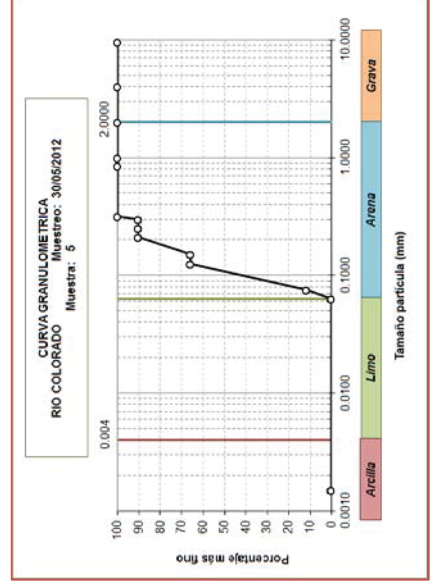
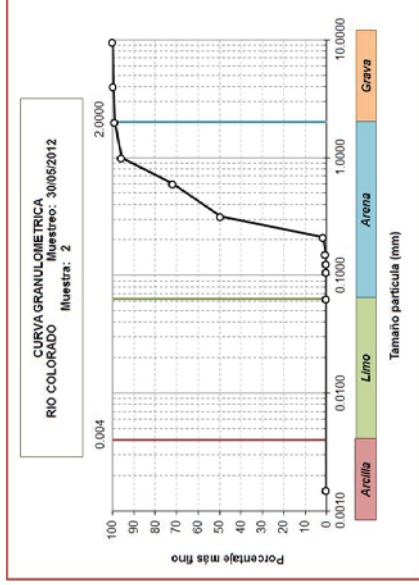
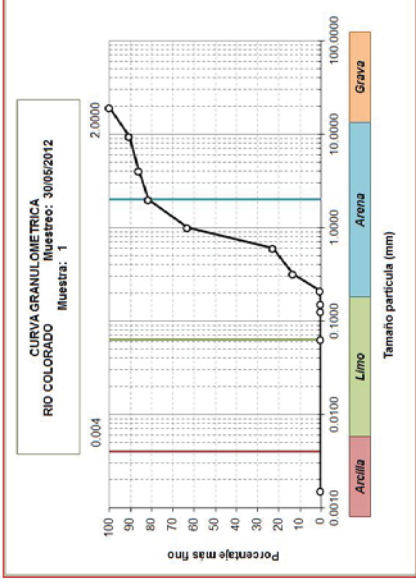
# Station 11-04 Delta Colorado

## 25 avril 2012



# Station 11-04 Delta Colorado

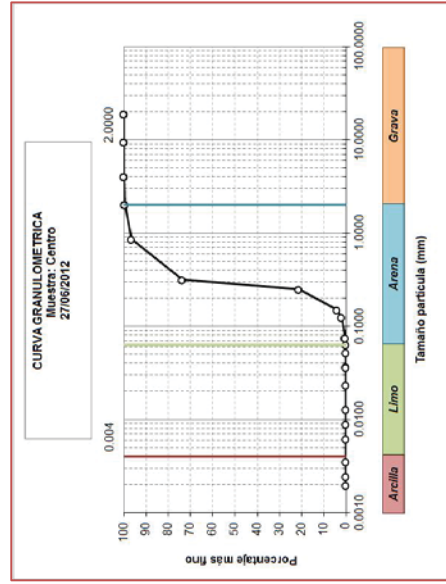
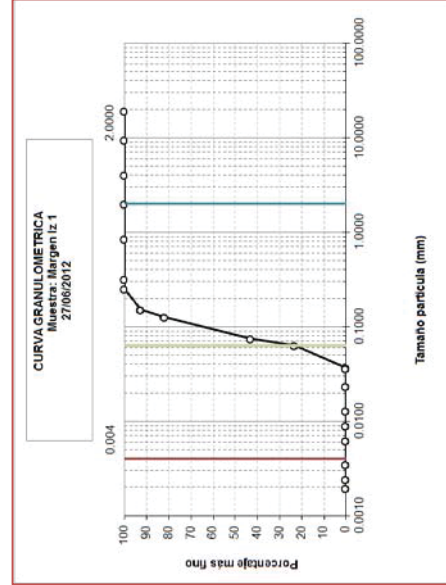
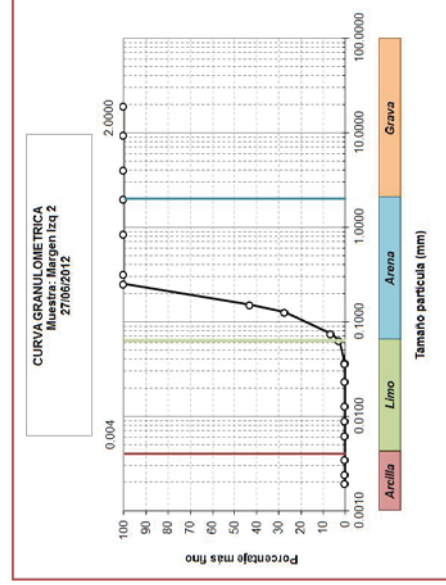
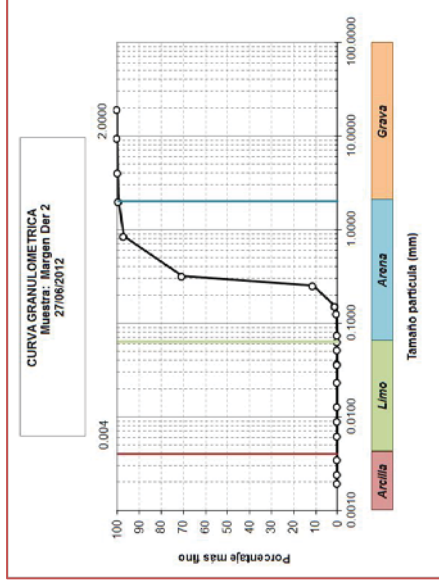
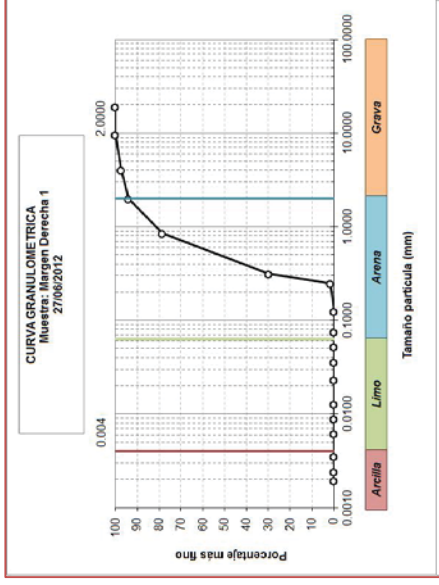
## 30 mai 2012





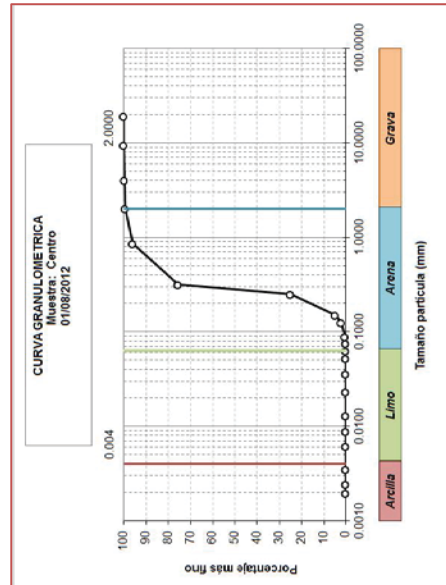
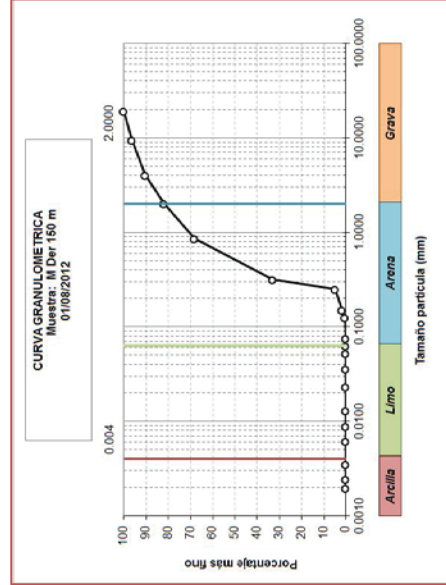
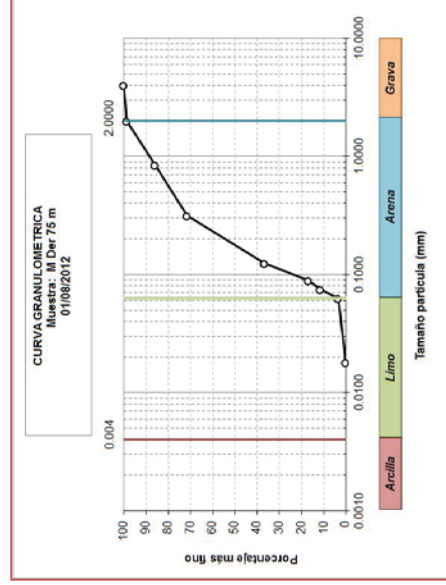
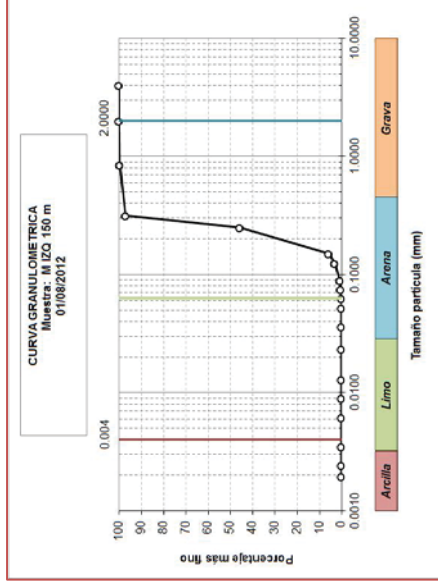
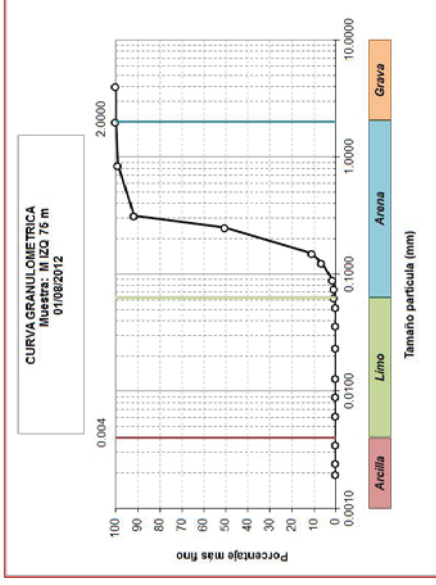
# Station 11-04 Delta Colorado

## 27 juin 2012



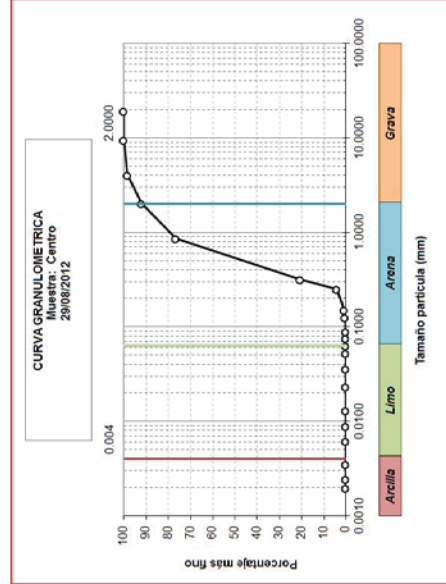
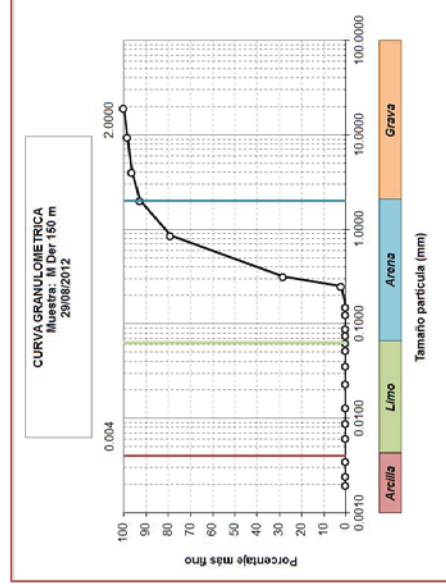
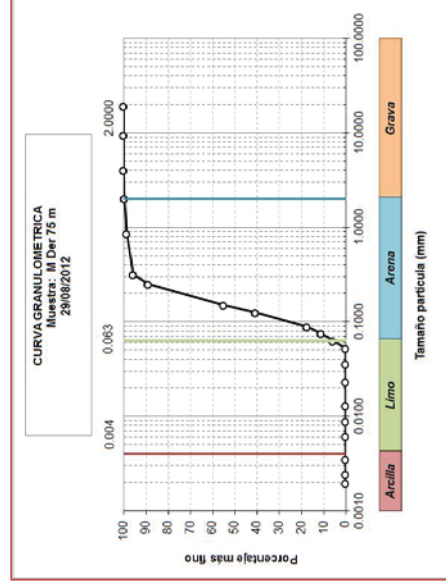
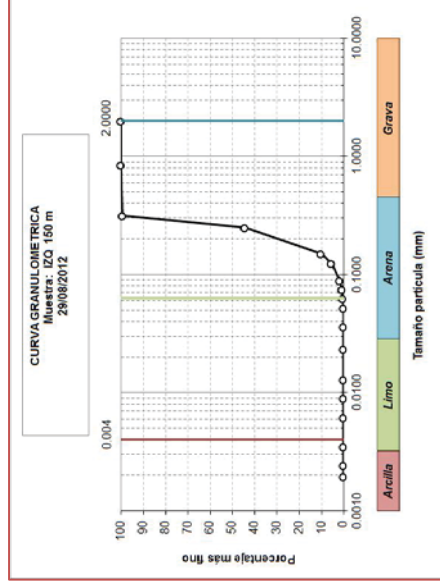
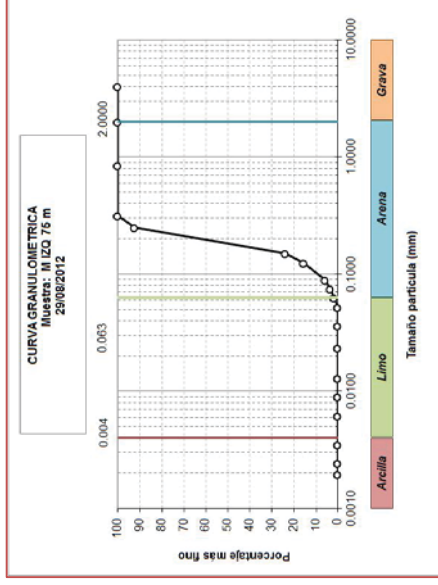
# Station 11-04 Delta Colorado

## 1er août 2012



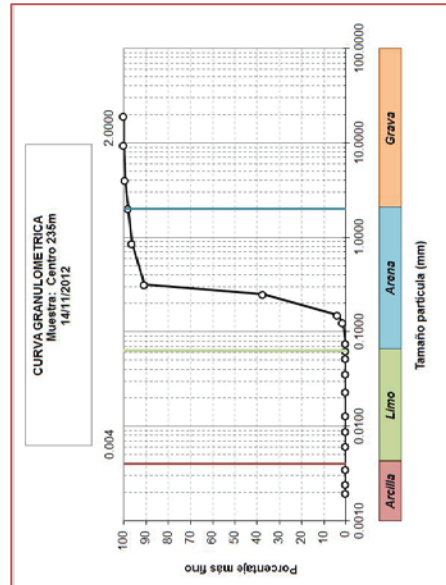
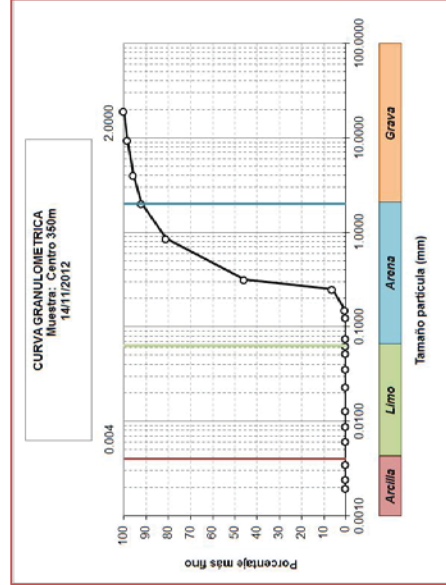
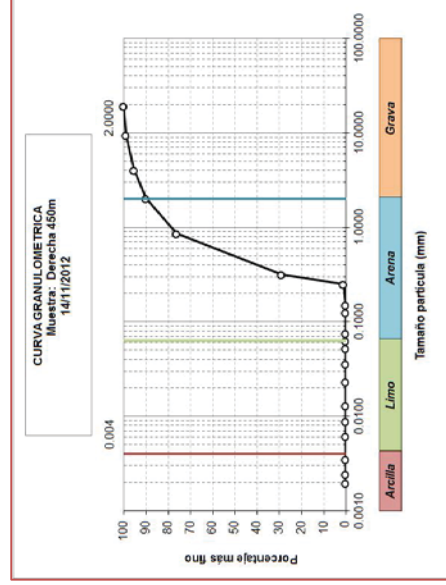
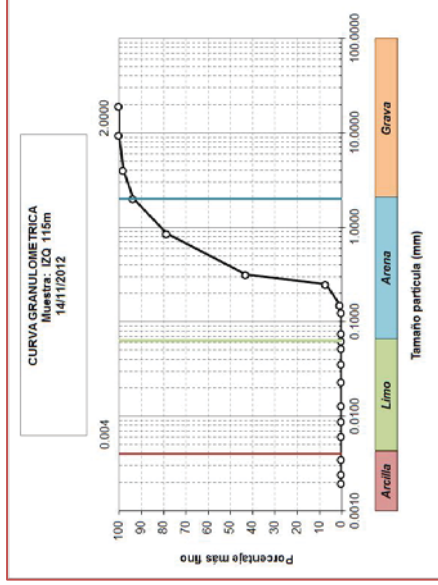
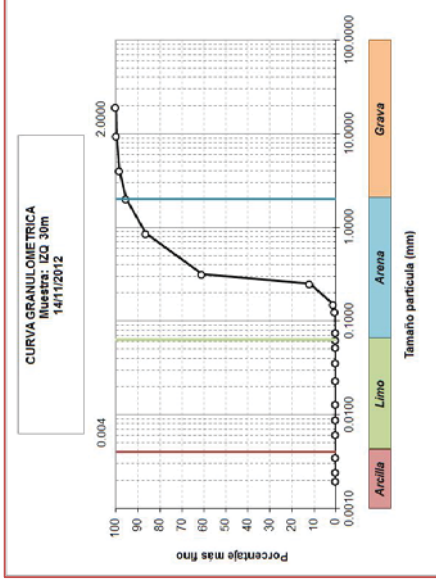
# Station 11-04 Delta Colorado

## 29 août 2012



# Station 11-04 Delta Colorado

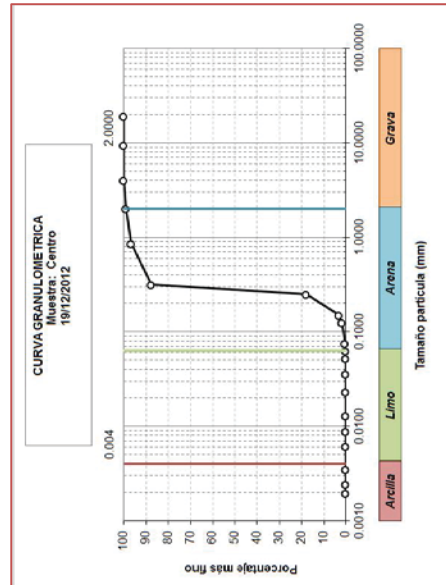
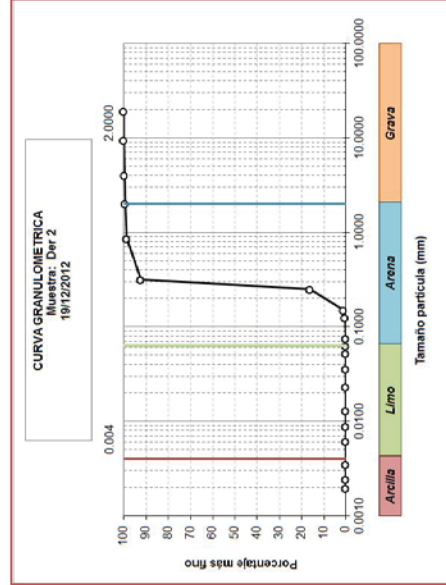
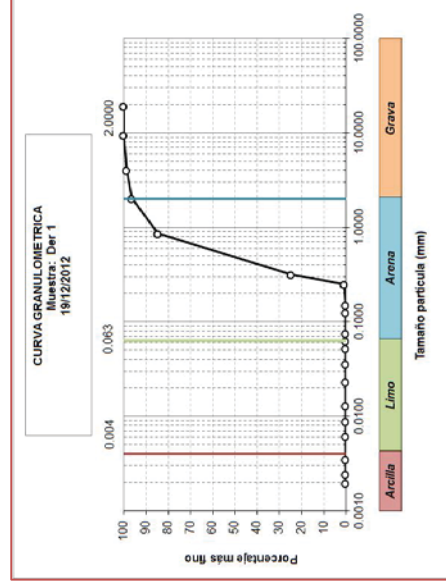
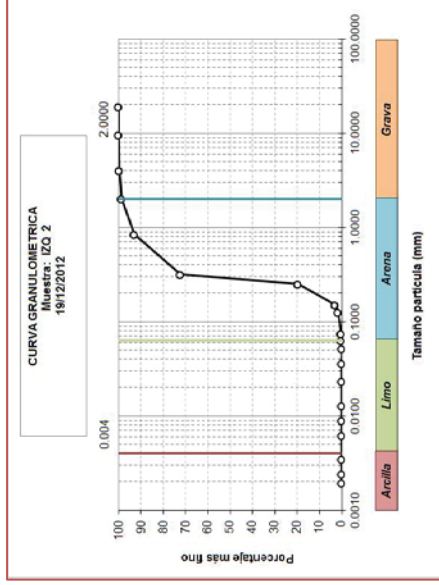
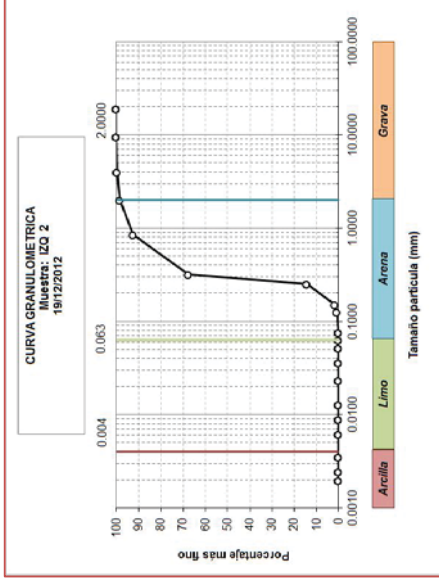
## 14 noviembre 2012





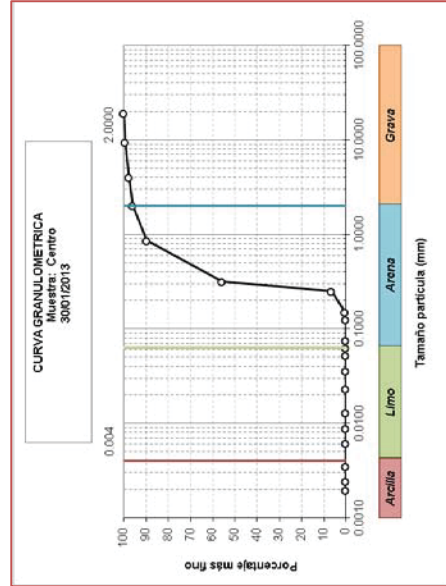
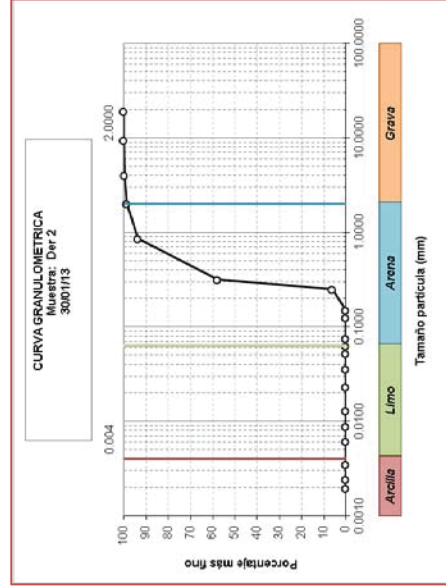
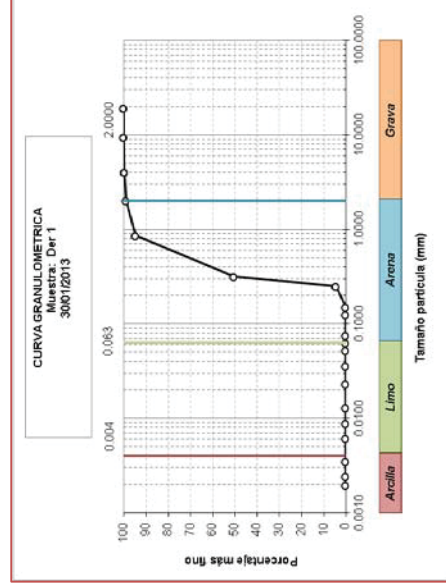
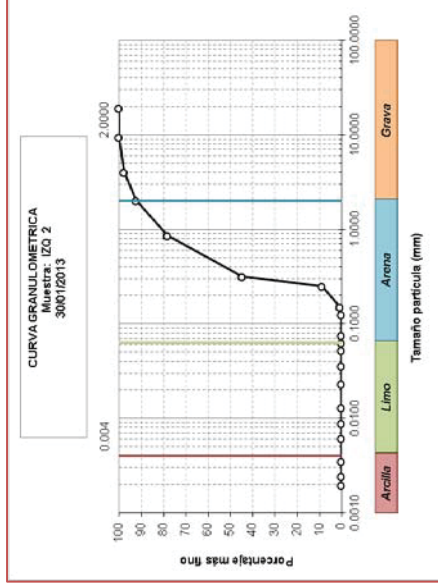
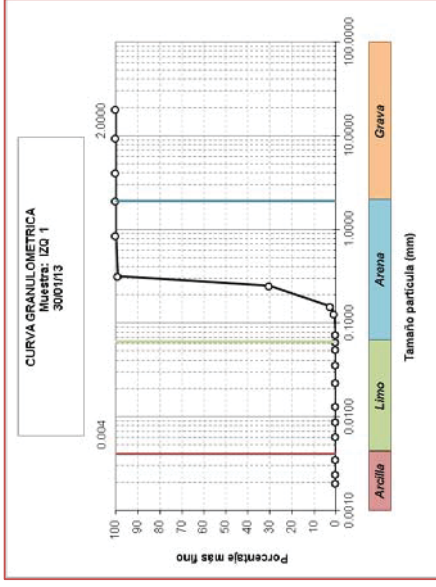
# Station 11-04 Delta Colorado

## 19 décembre 2012



# Station 11-04 Delta Colorado

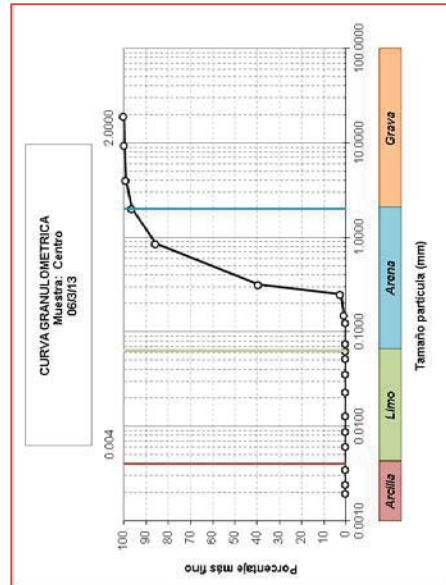
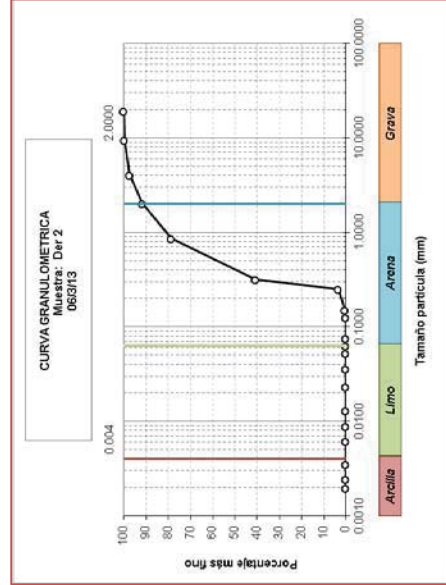
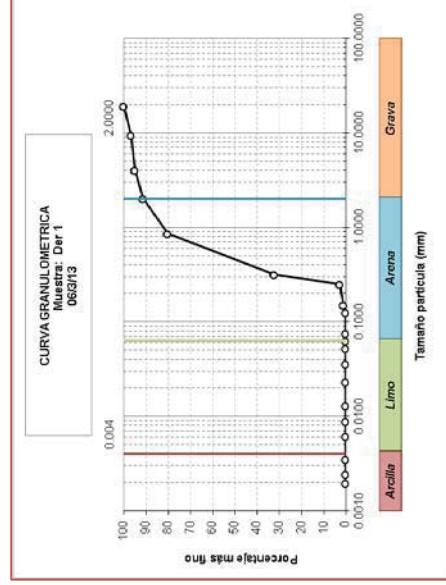
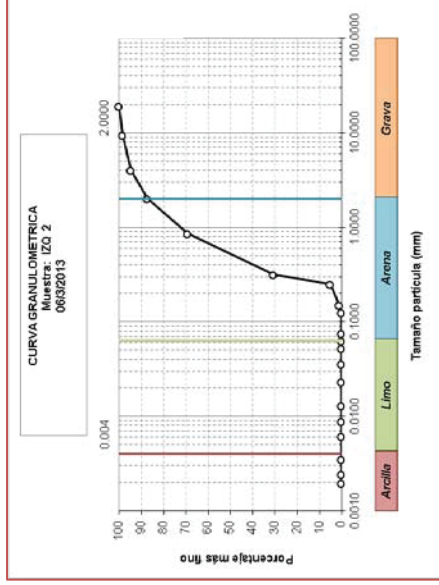
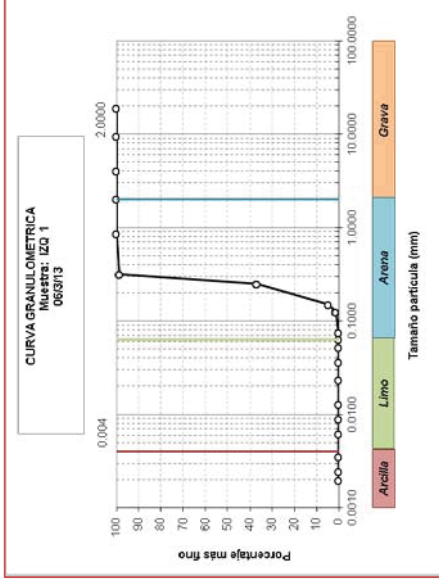
## 30 janvier 2013





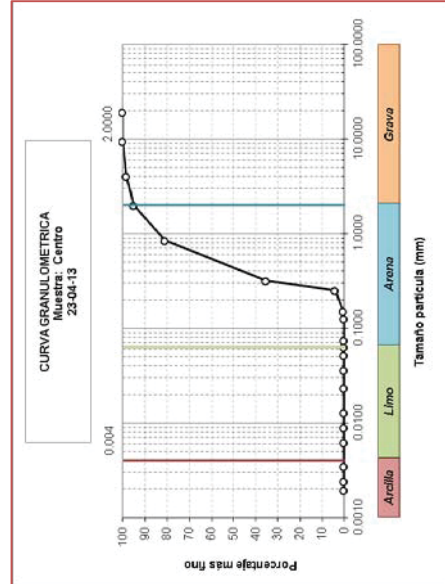
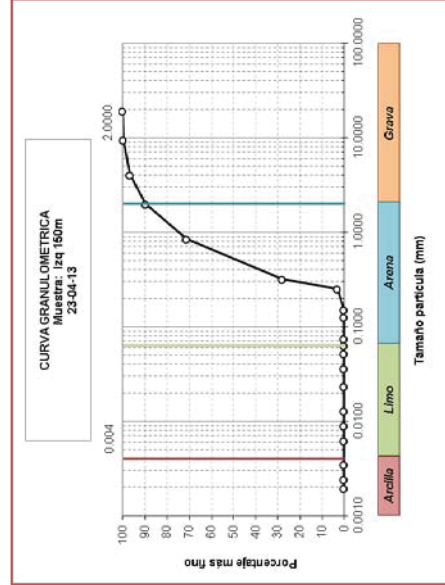
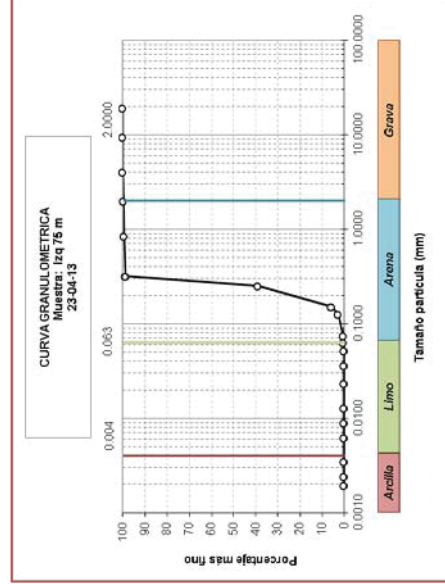
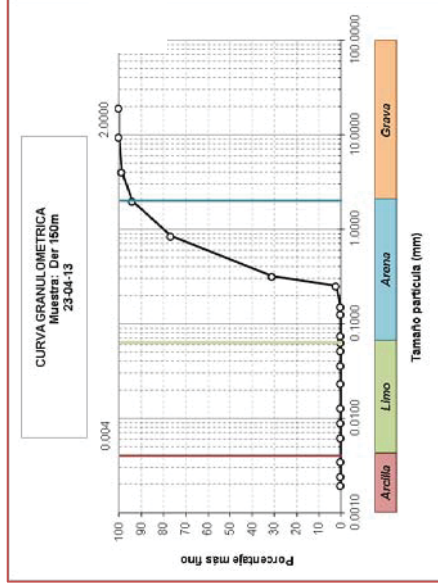
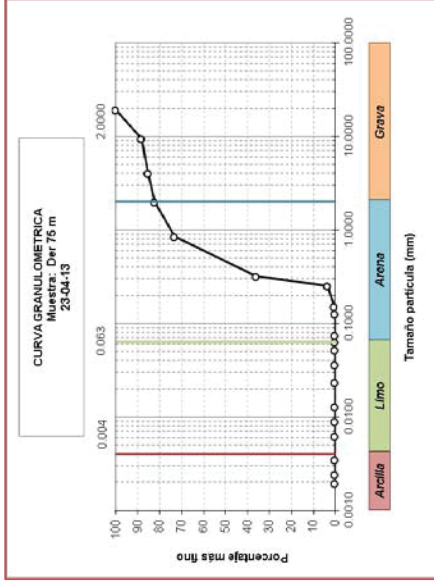
# Station 11-04 Delta Colorado

## 6 mars 2013



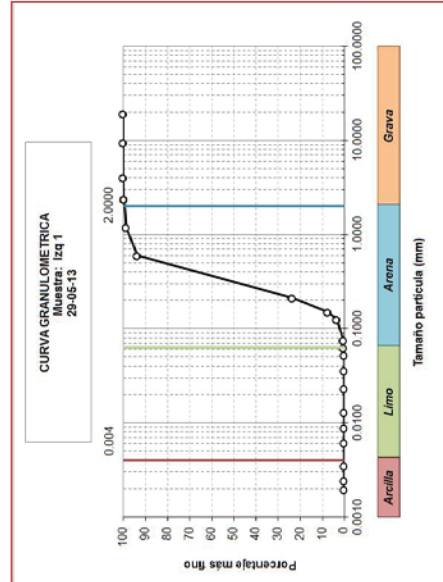
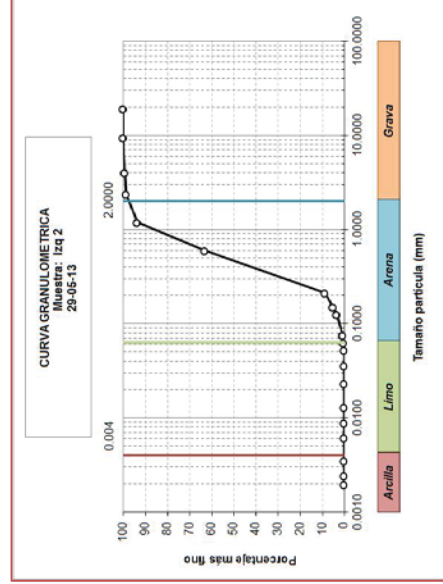
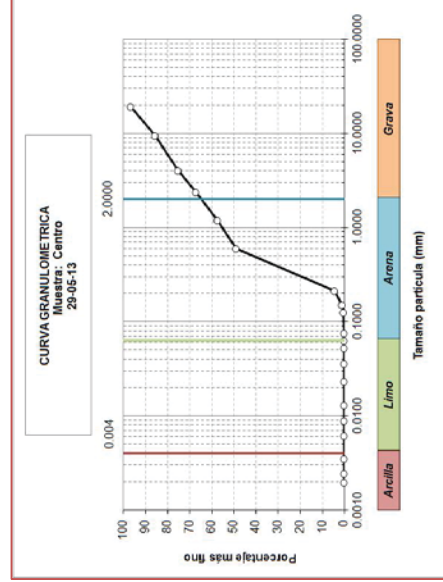
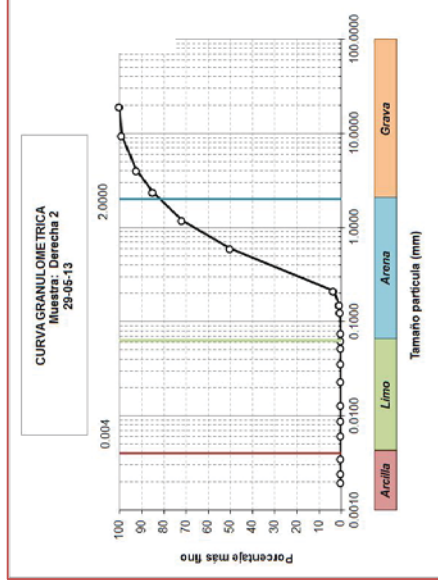
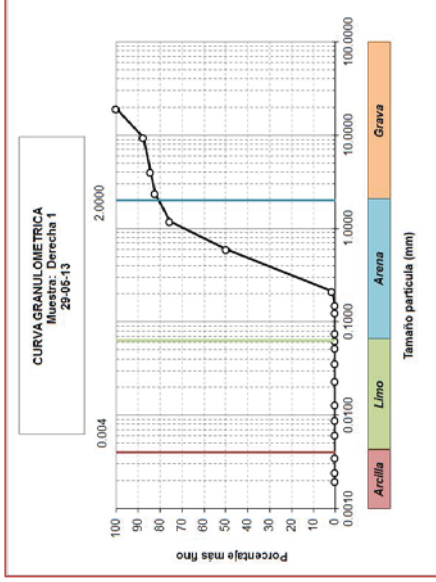
# Station 11-04 Delta Colorado

## 22 avrìl 2013



# Station 11-04 Delta Colorado

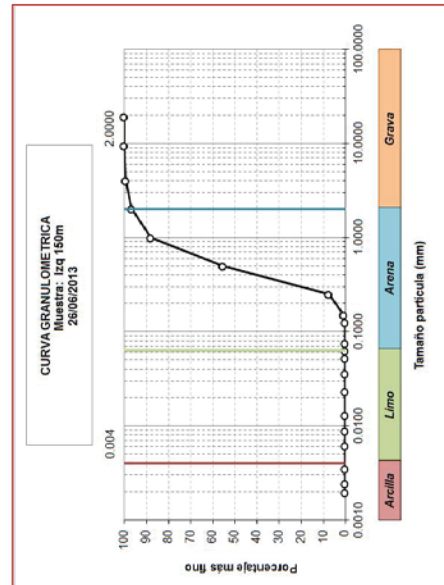
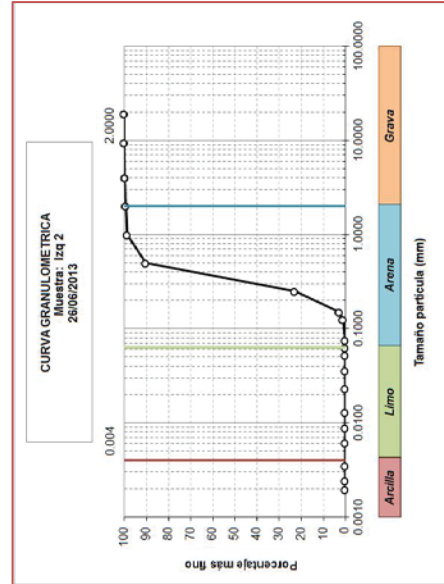
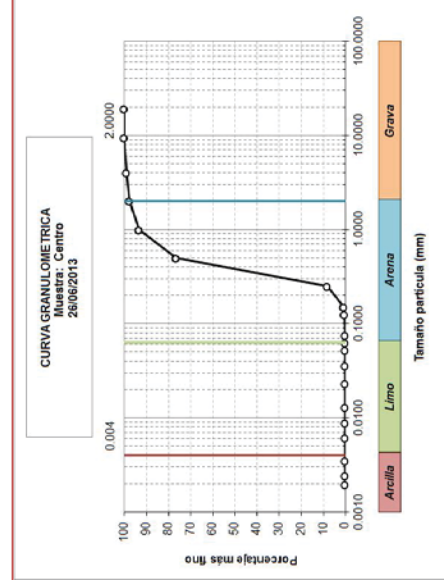
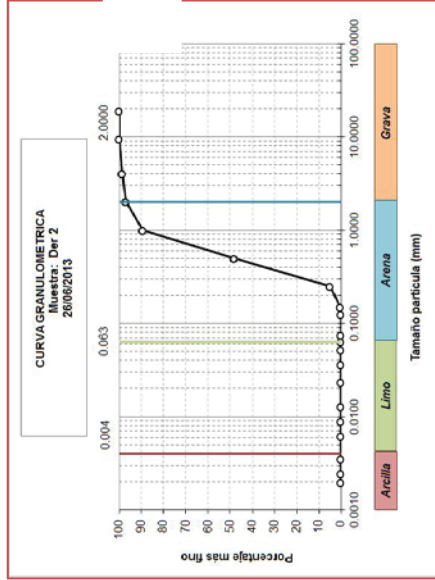
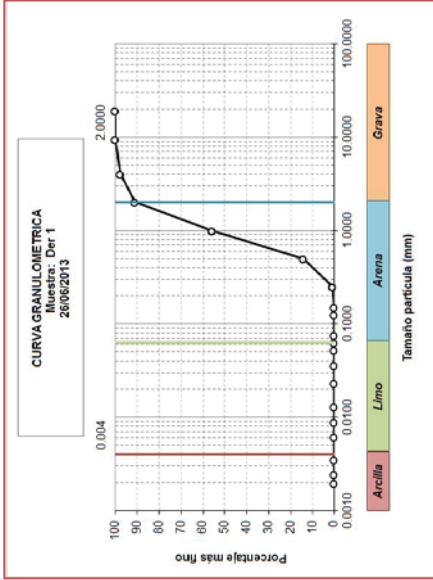
29 mai 2013





# Station 11-04 Delta Colorado

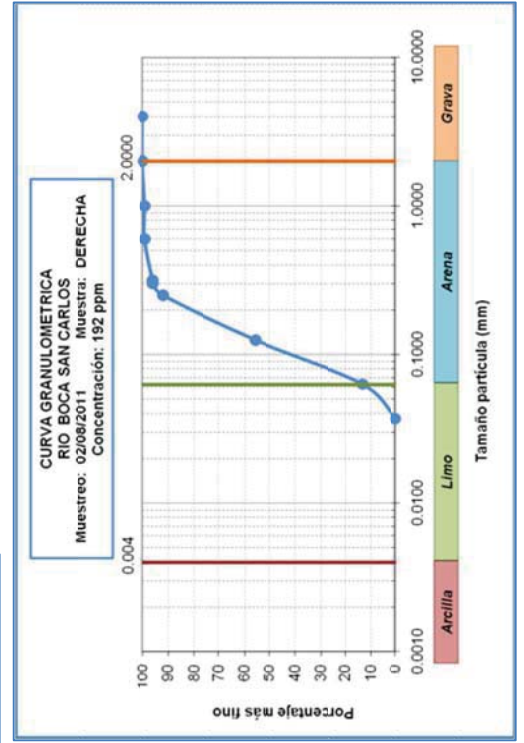
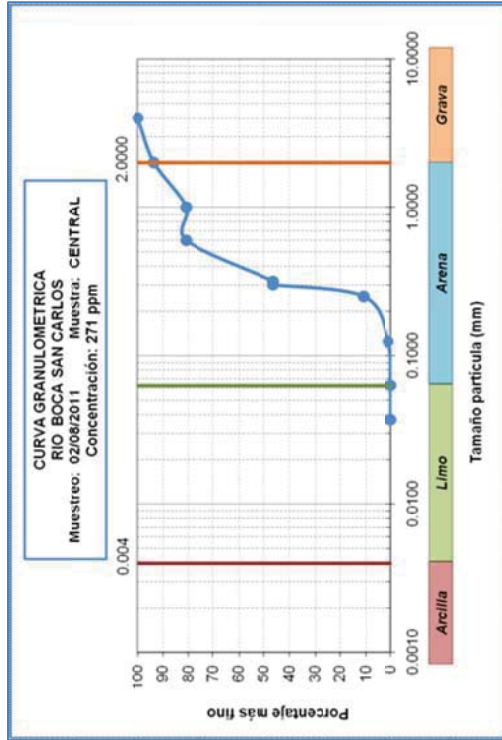
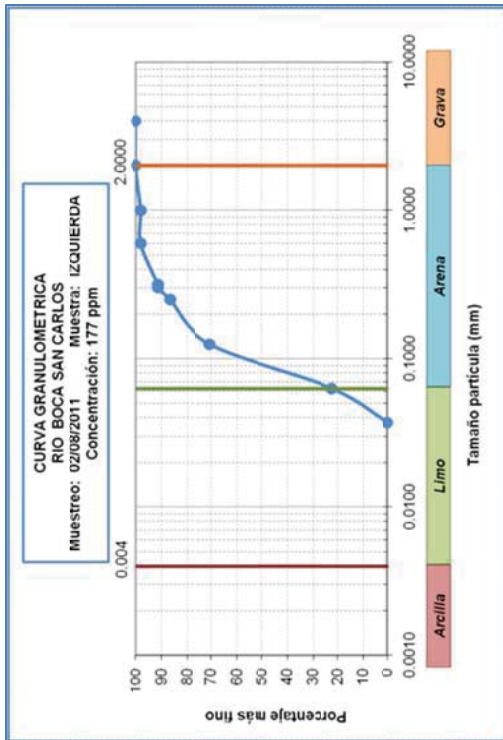
## 26 jun 2013



# **Sédiments prélevés sur le fonds : répartition de la taille des particules**

## **Embouchure du San Carlos**

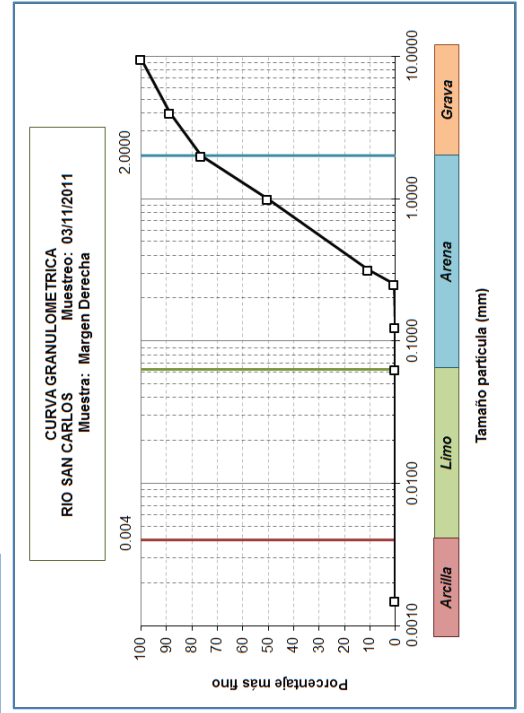
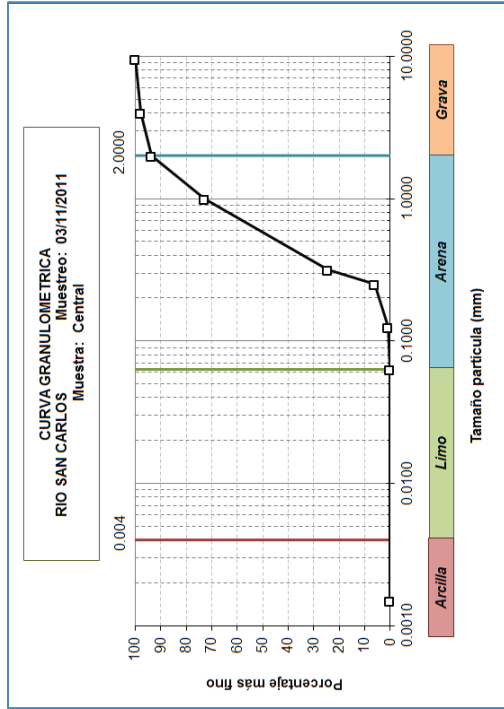
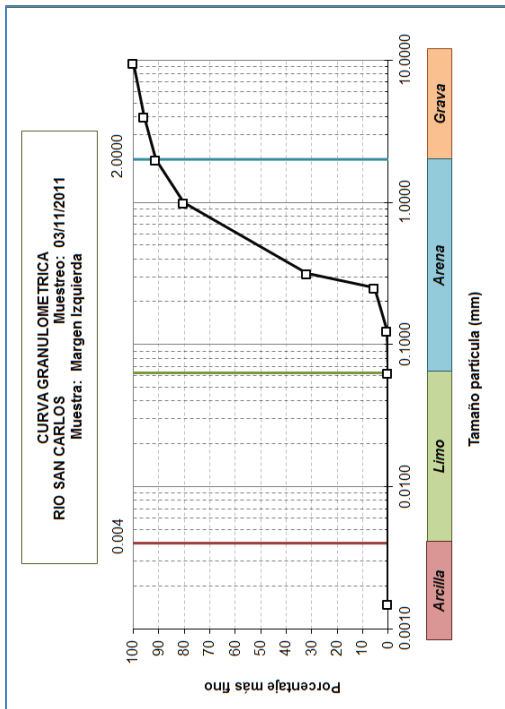
# Embouchure du fleuve San Carlos 2 août 2011



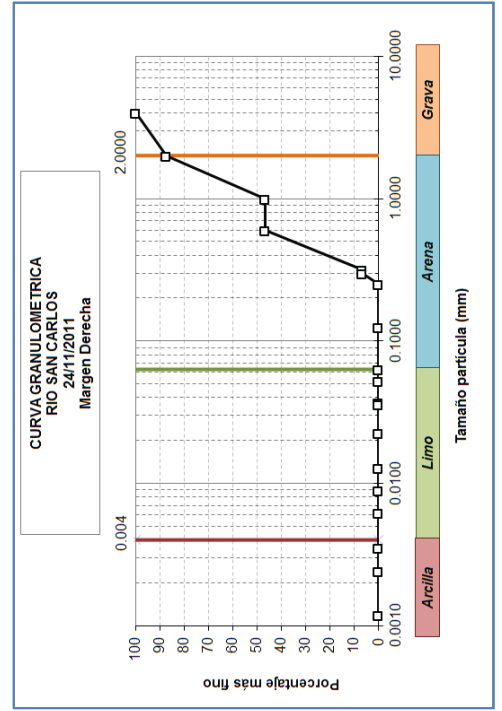
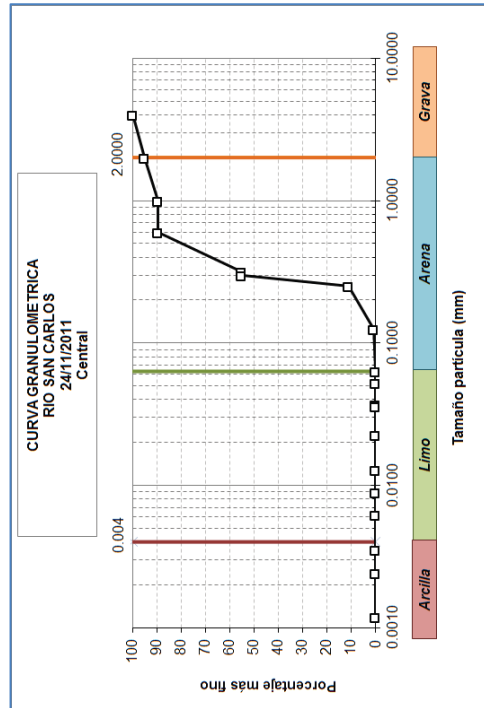
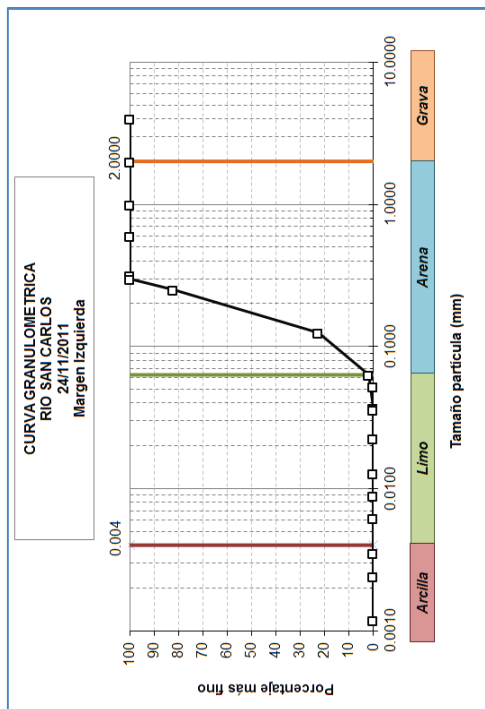


# Embouchure du fleuve San Carlos

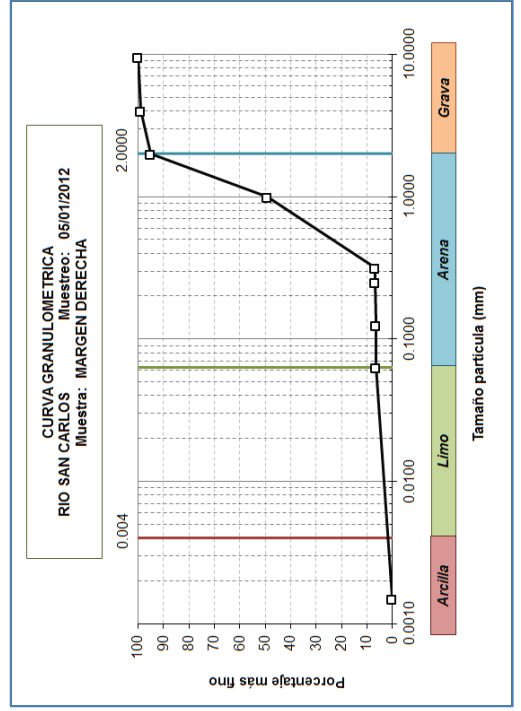
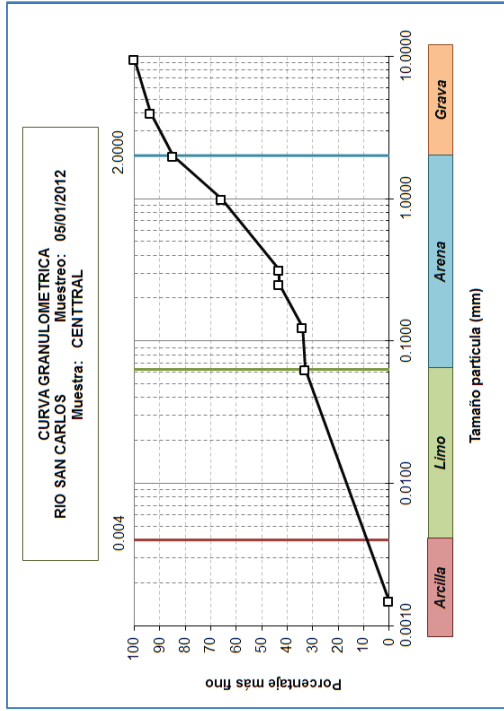
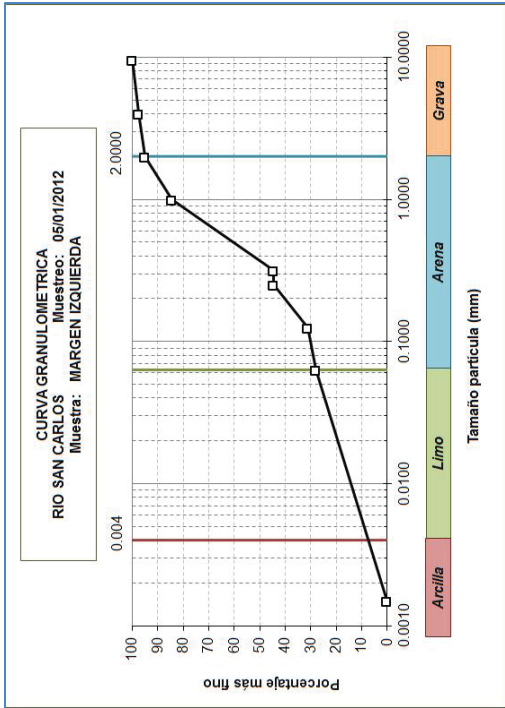
## 3 novembre 2011



# Embouchure du fleuve San Carlos 24 novembre 2011

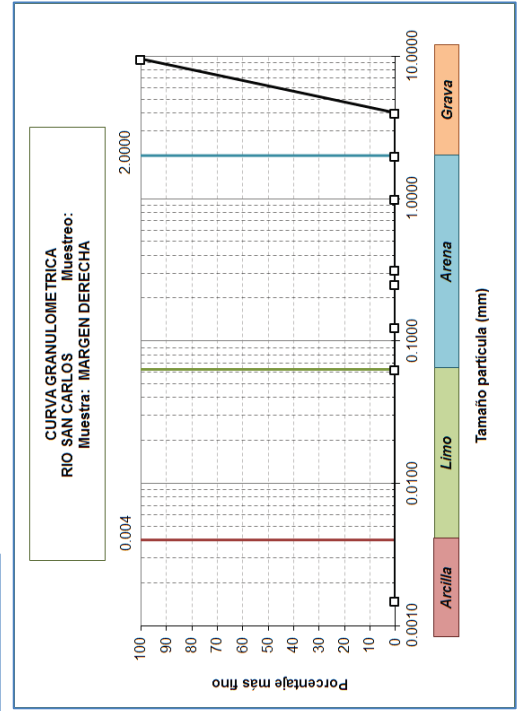
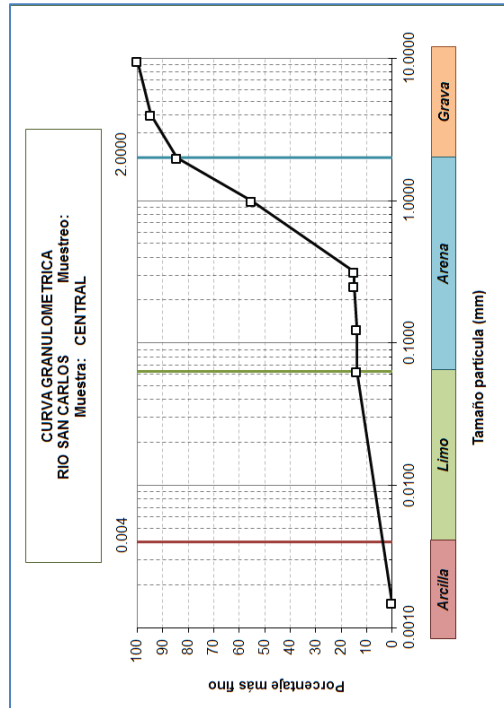
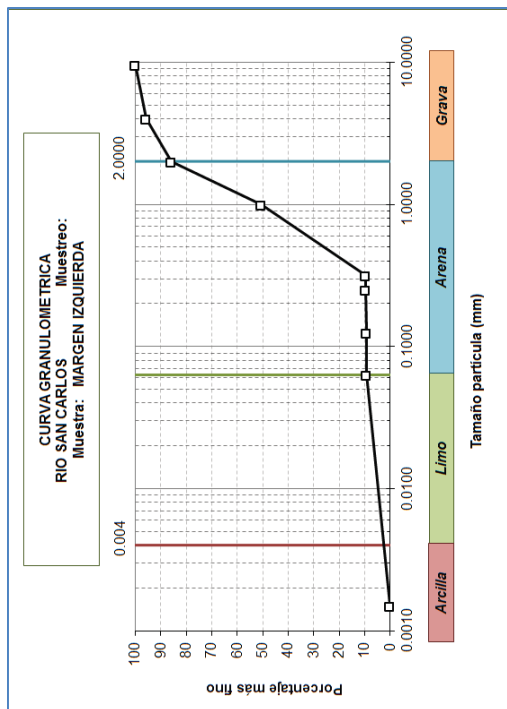


# Embouchure du fleuve San Carlos 5 janvier 2012



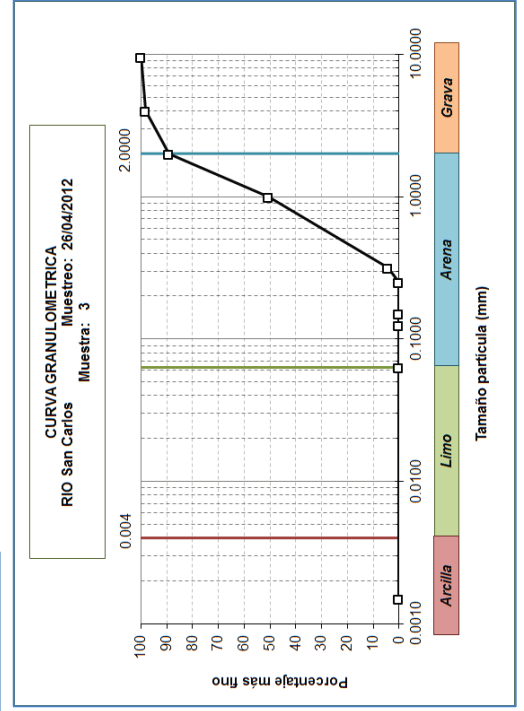
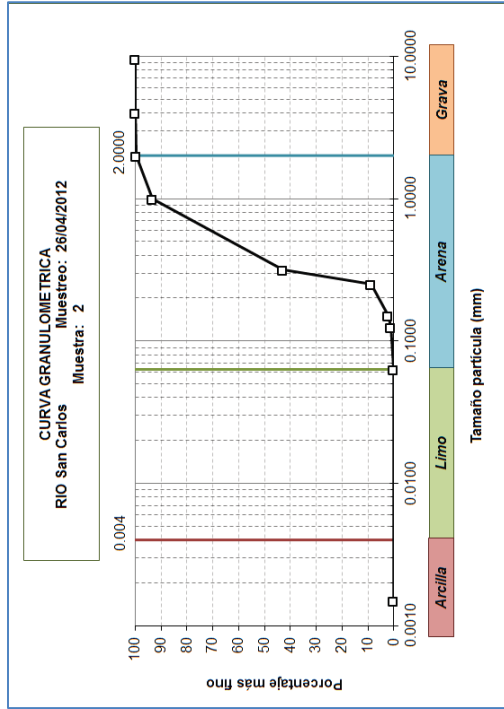
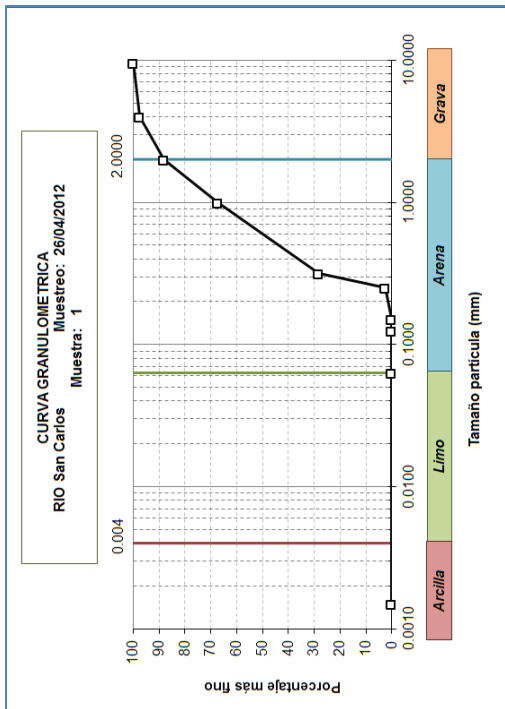
# Embouchure du fleuve San Carlos

## 23 février 2012



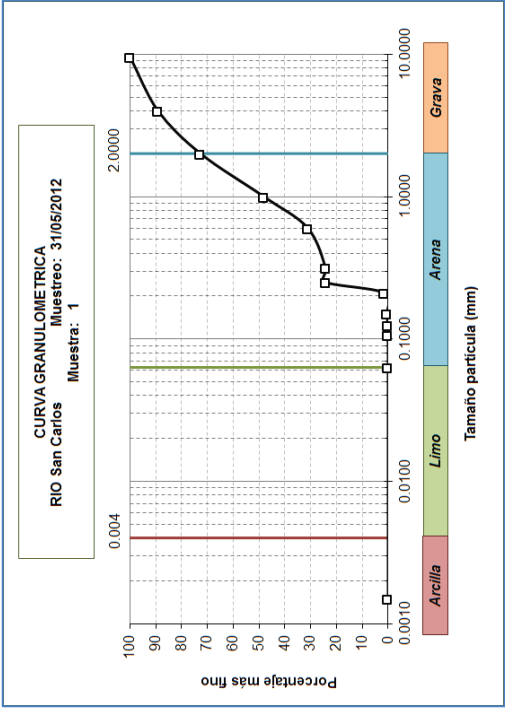
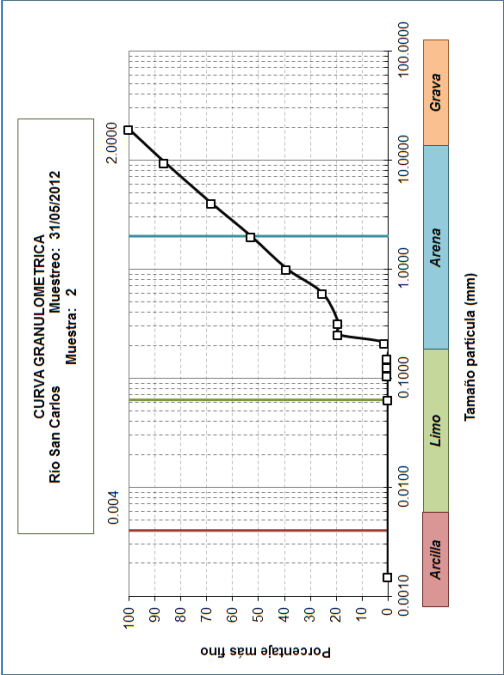
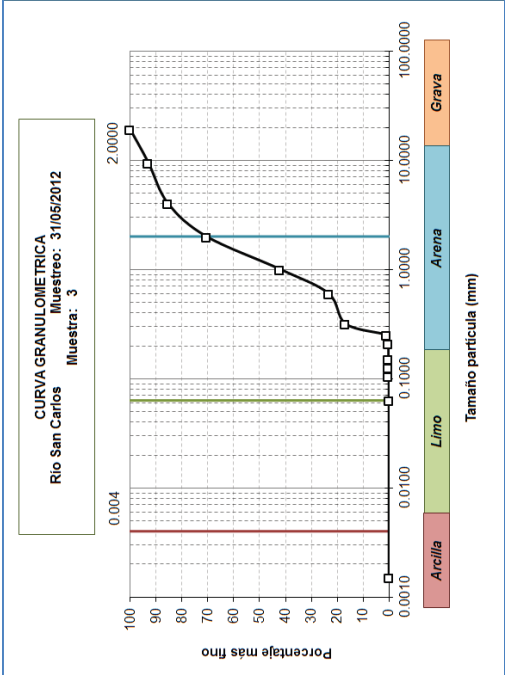
# Embouchure du fleuve San Carlos

## 26 avril 2012



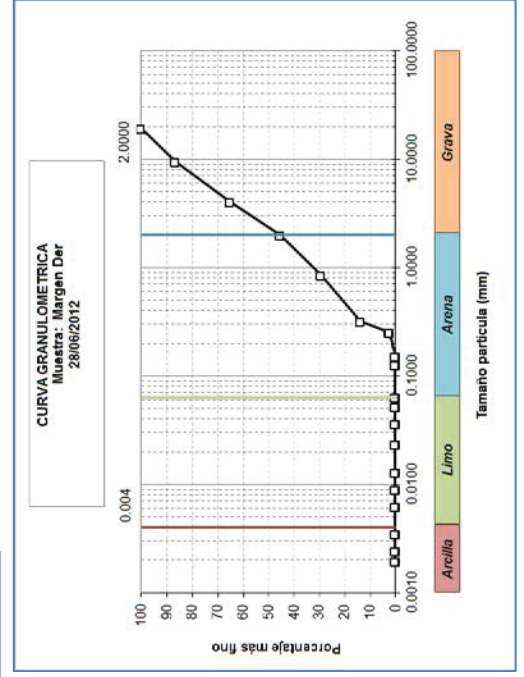
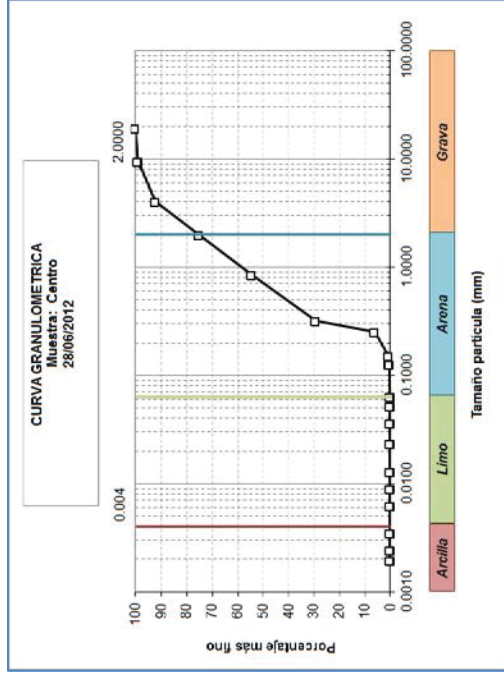
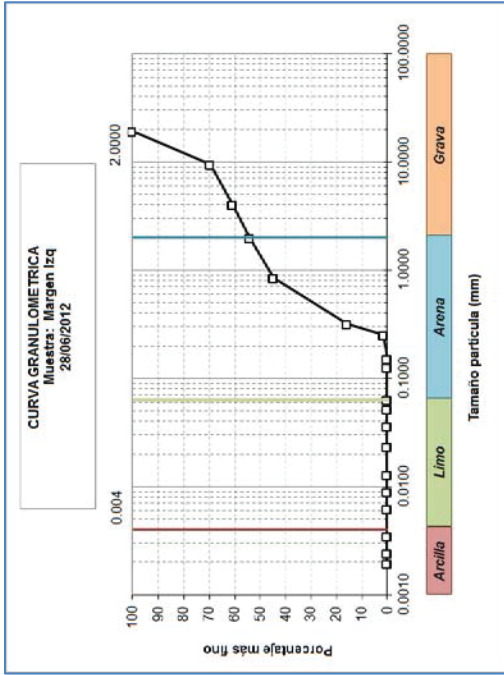
# Embouchure du fleuve San Carlos

## 31 mai 2012

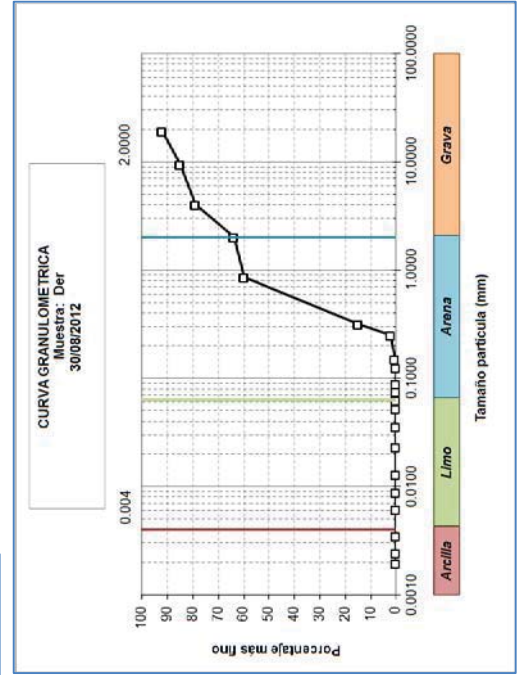
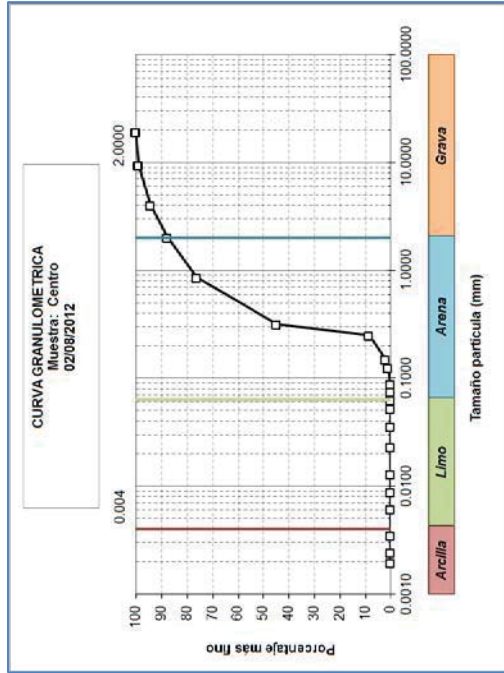
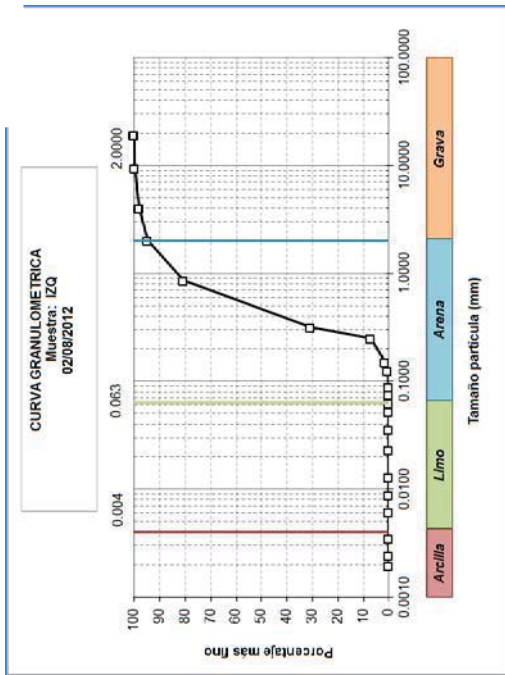




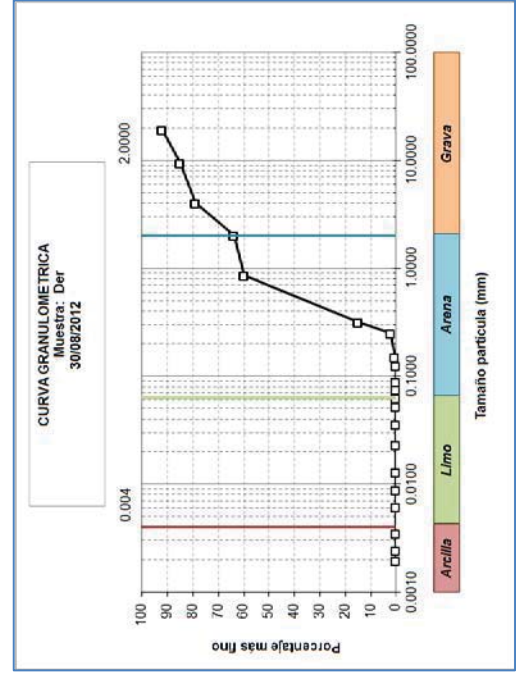
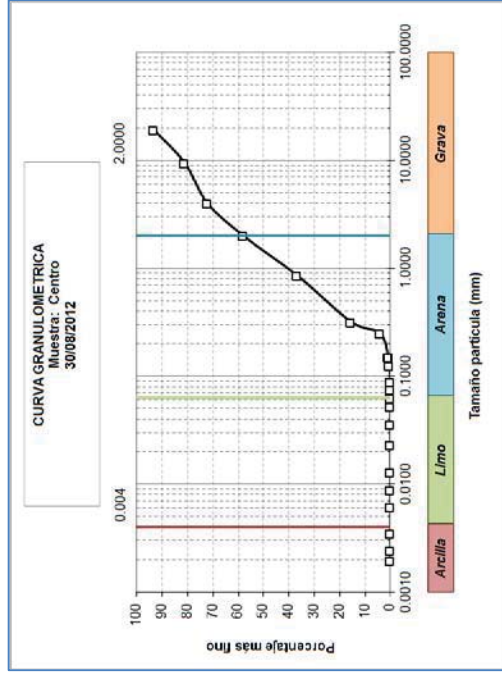
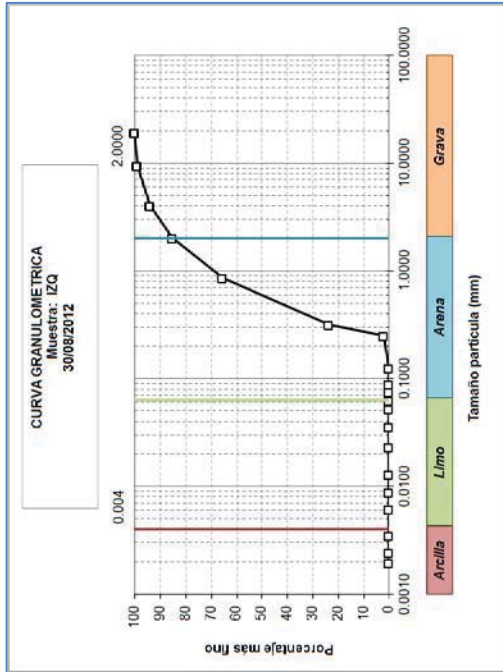
# Embouchure du fleuve San Carlos 28 juin 2012



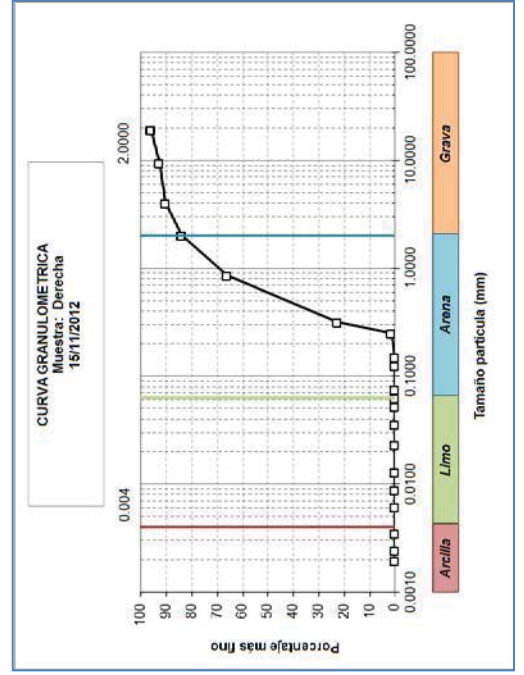
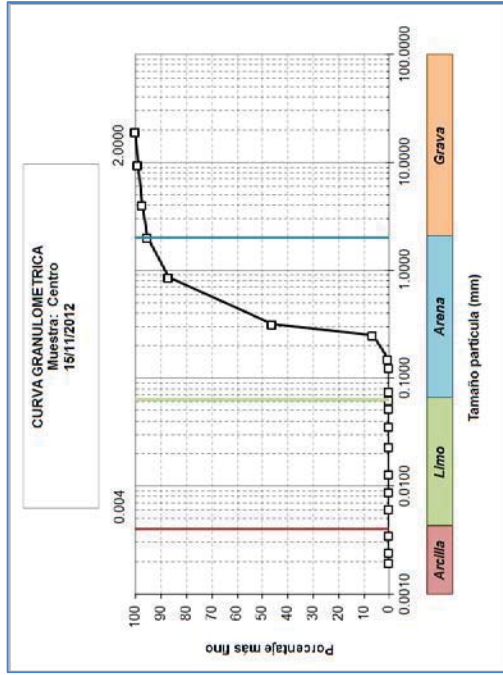
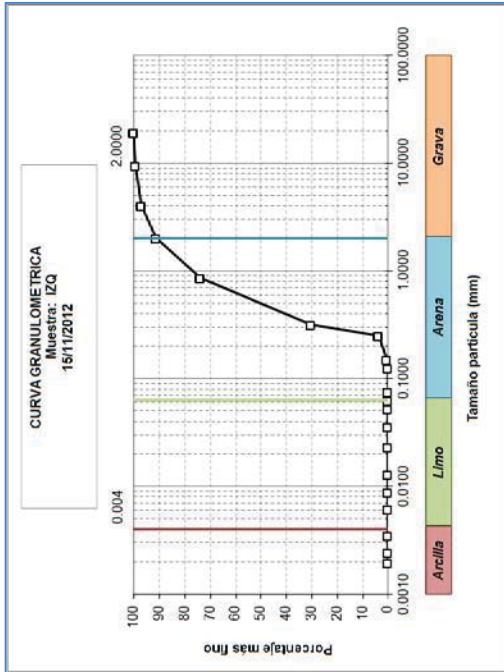
# Embouchure du fleuve San Carlos 2 août 2012



# Embouchure du fleuve San Carlos 30 août 2012

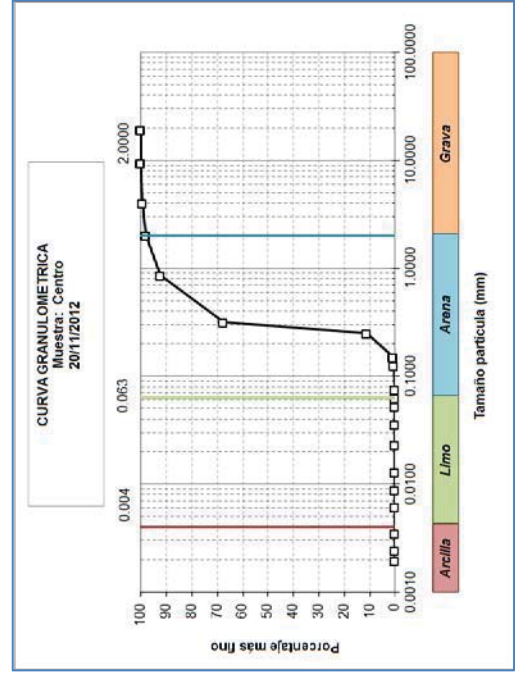
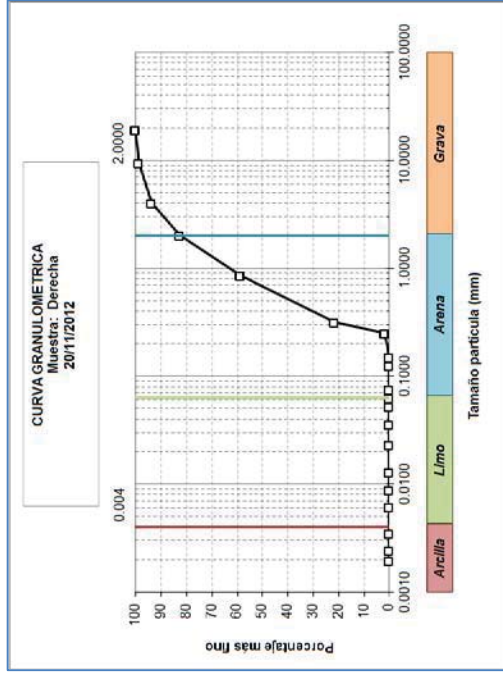
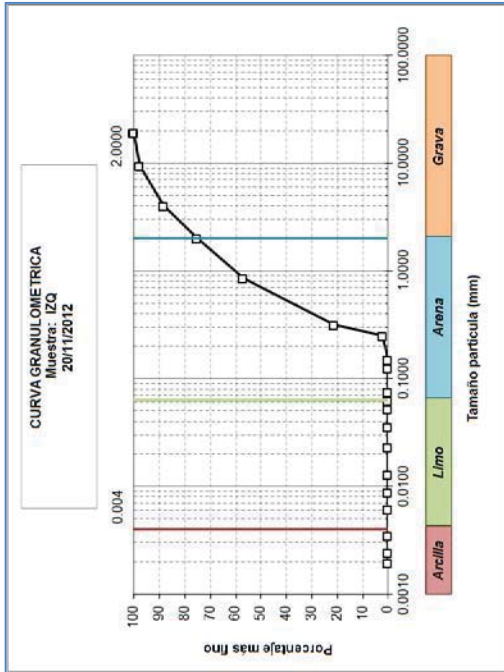


# Embouchure du fleuve San Carlos 15 novembre 2012

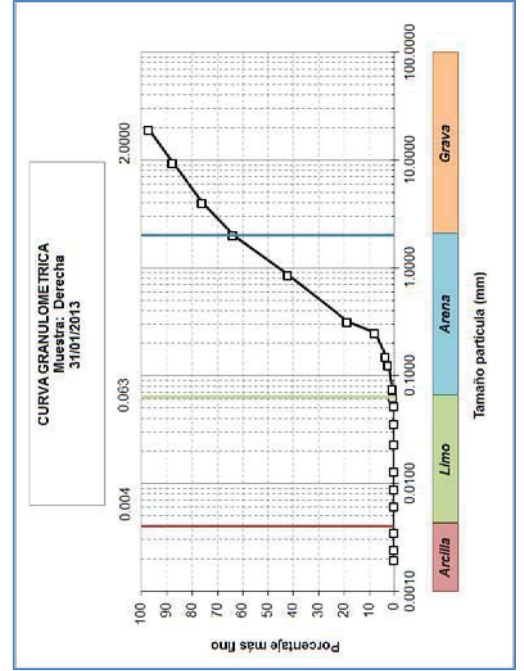
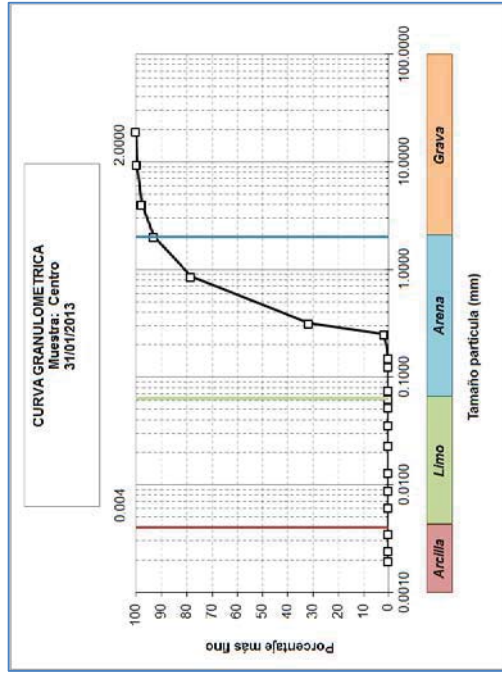
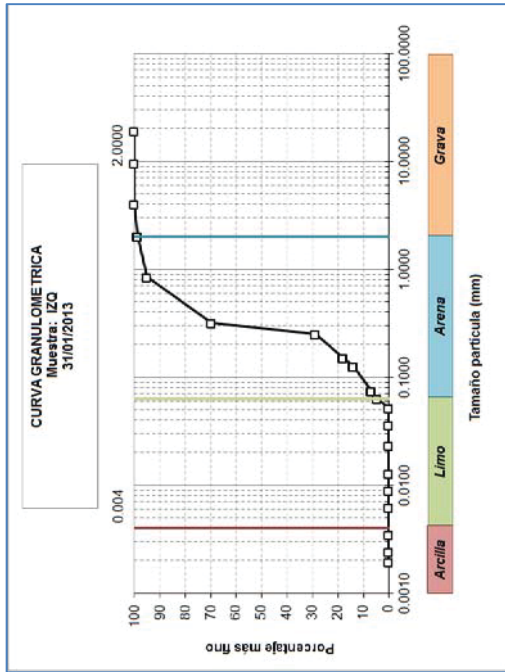




# Embouchure du fleuve San Carlos 20 décembre 2012

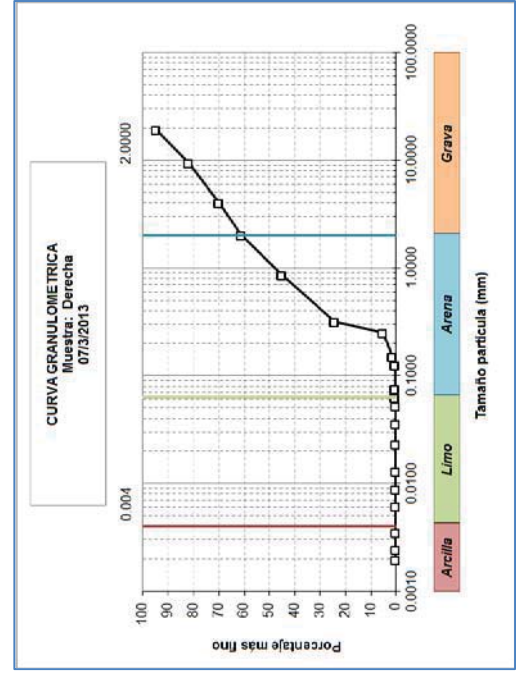
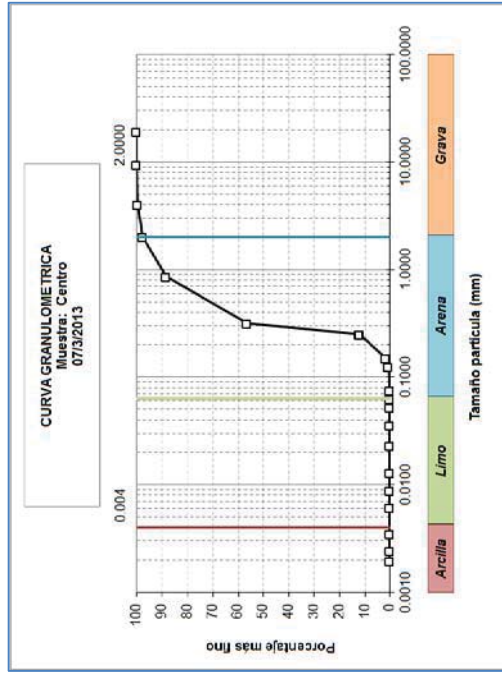
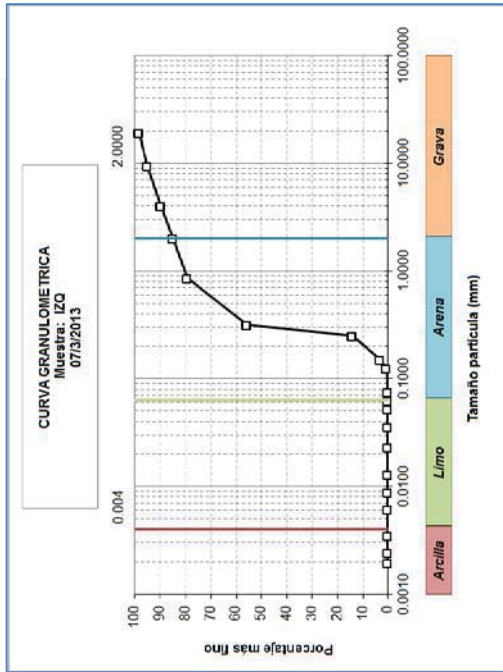


# Embouchure du fleuve San Carlos 31 janvier 2013

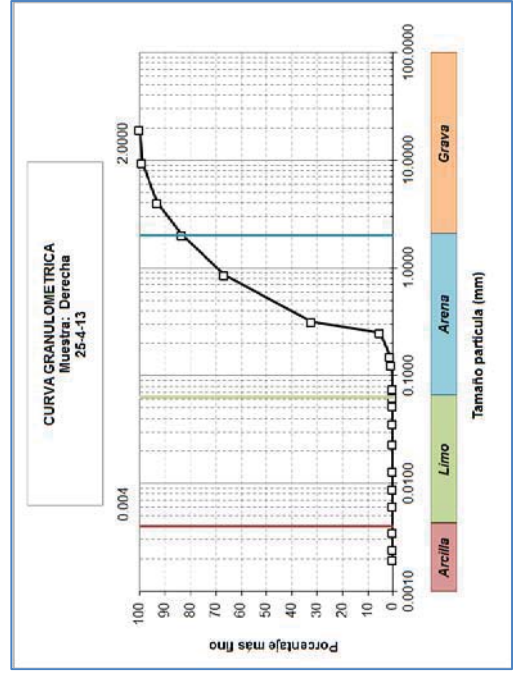
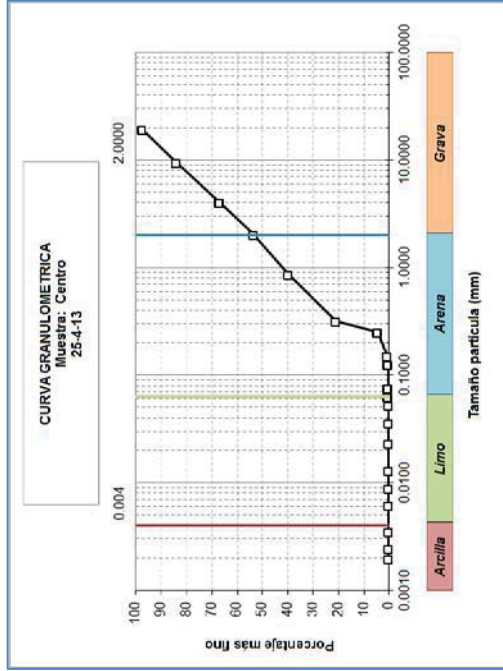
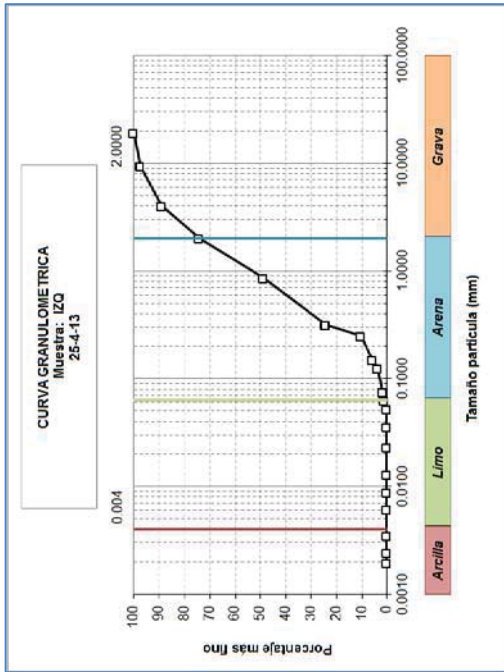




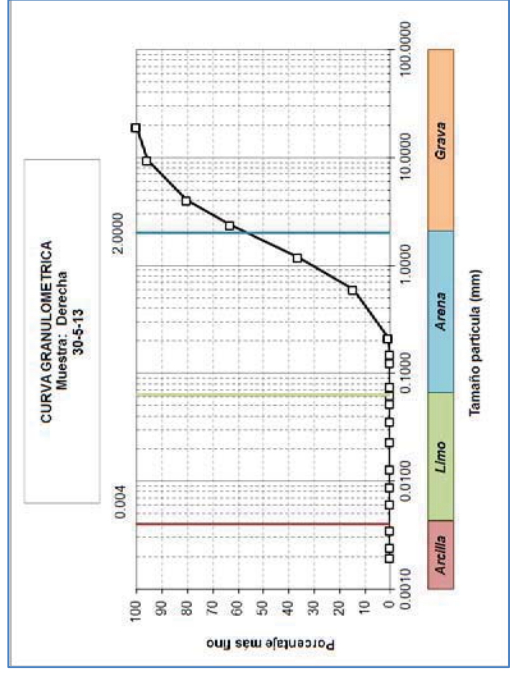
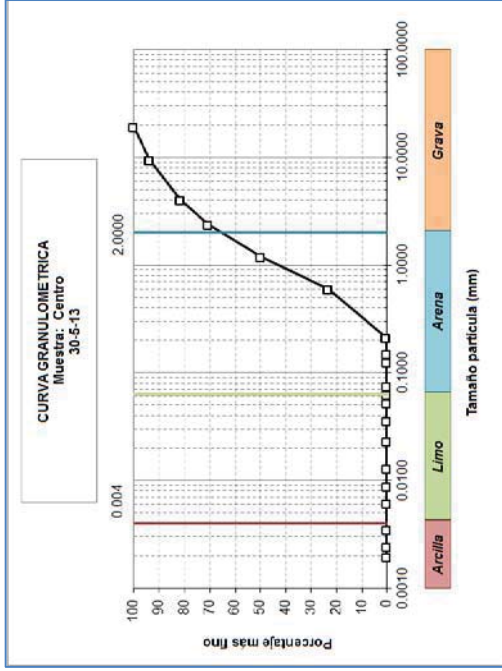
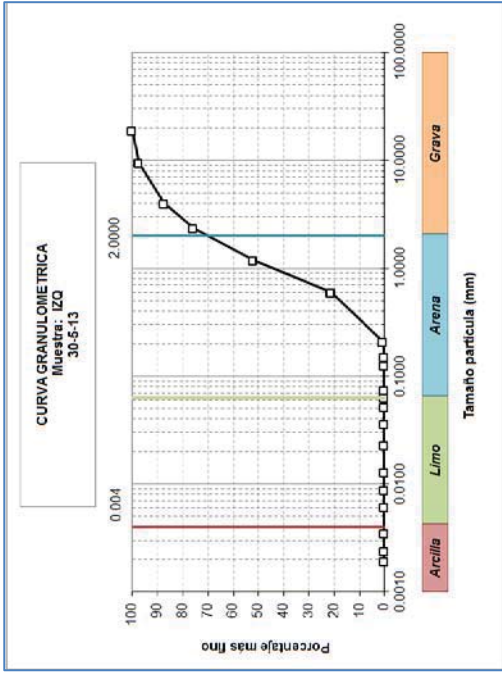
# Embouchure du fleuve San Carlos 7 mars 2013



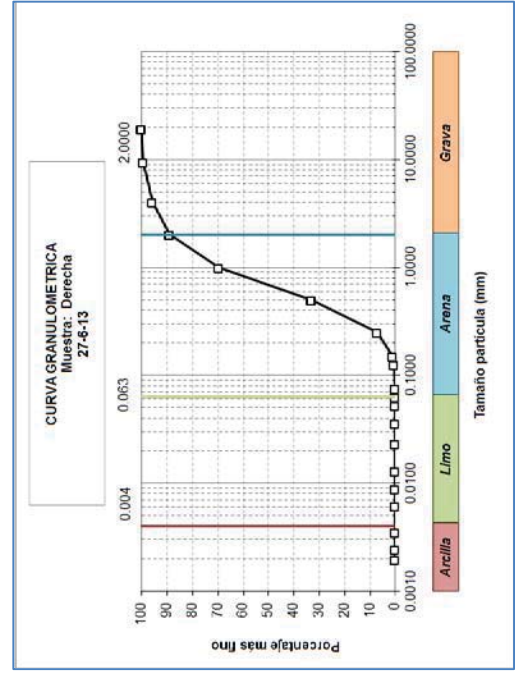
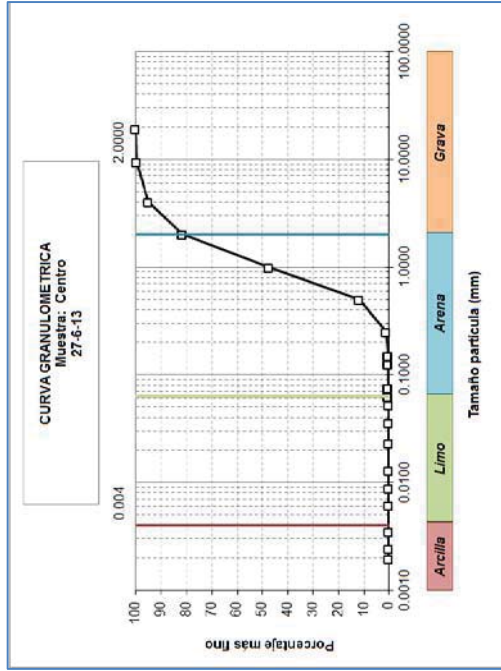
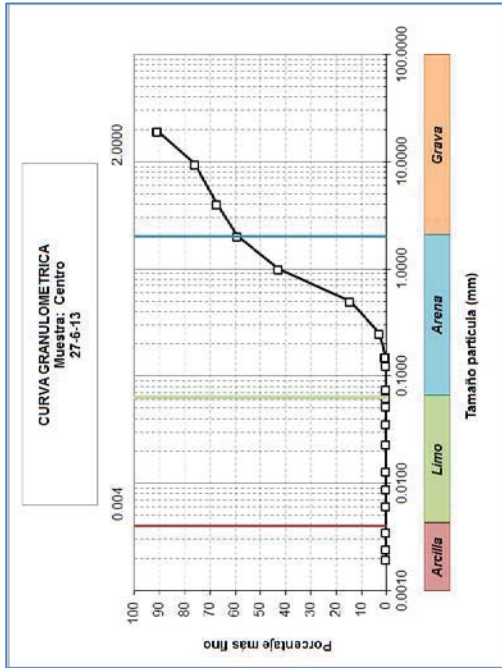
# Embouchure du fleuve San Carlos 25 avril 2013



# Embouchure du fleuve San Carlos 30 mai 2013



# Embouchure du fleuve San Carlos 27 juin 2013

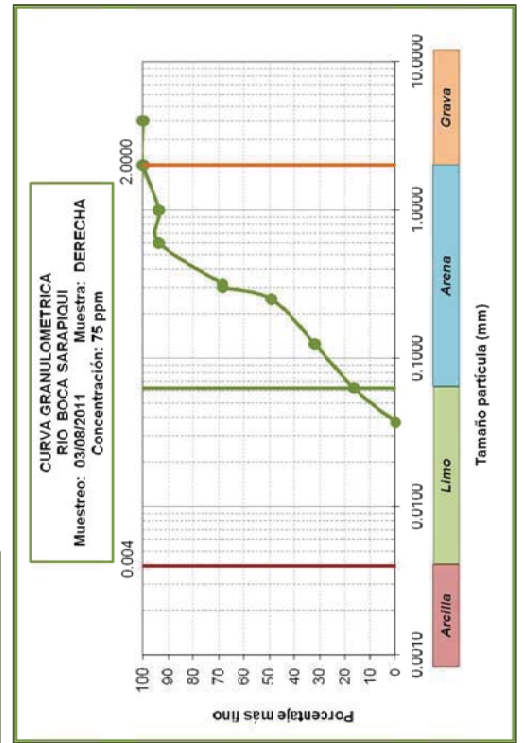
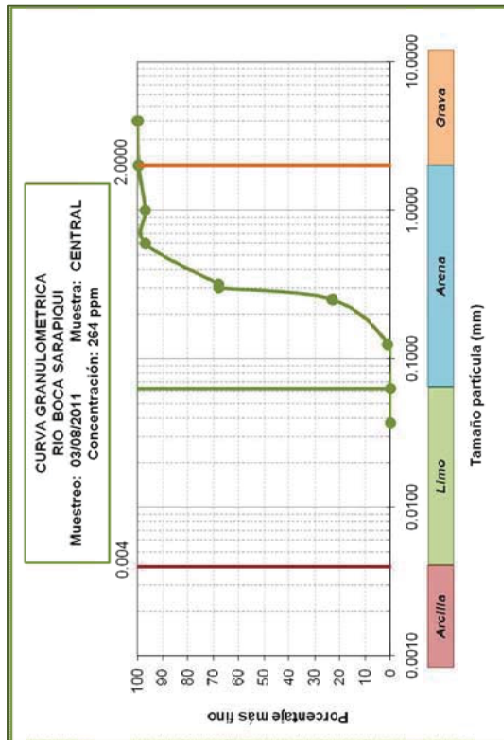
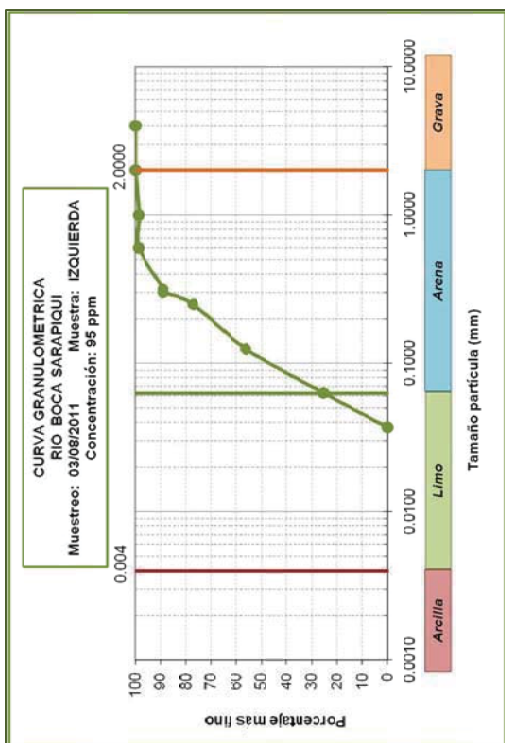


# **Sédiments prélevés sur le fonds : répartition de la taille des particules**

## **Embouchure du Sarapiquí**



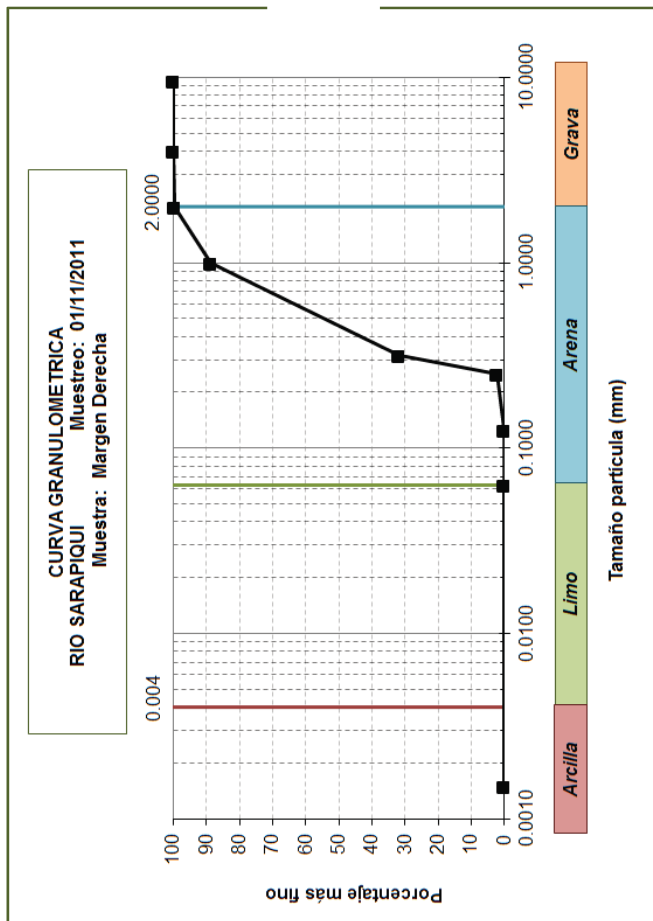
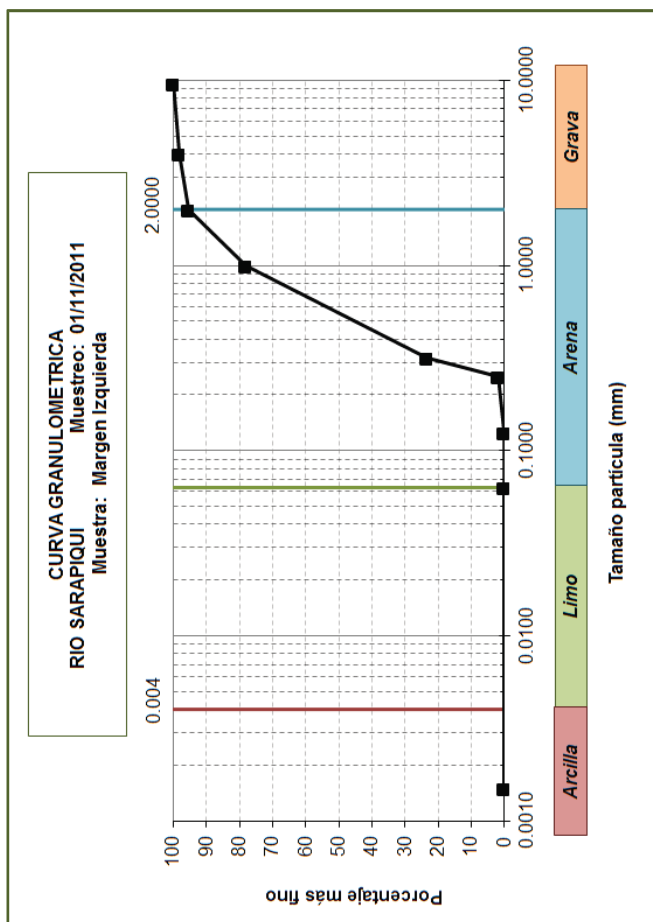
# Embouchure du fleuve Sarapiquí 3 août 2011





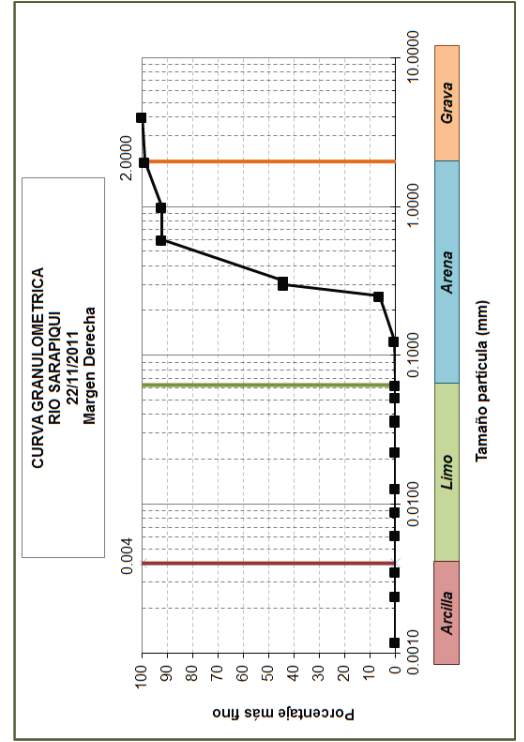
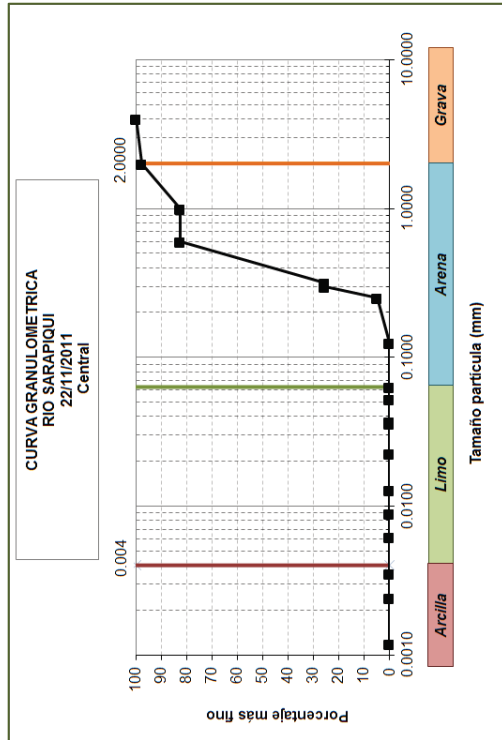
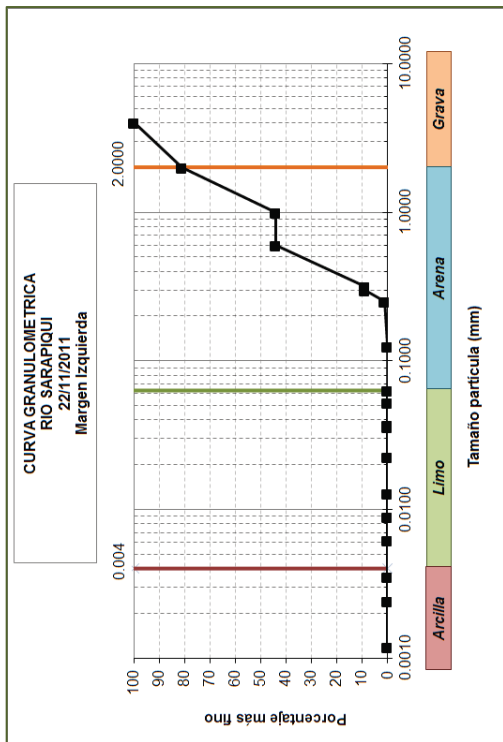
# Embouchure du fleuve Sarapiquí

## 2 novembre 2011

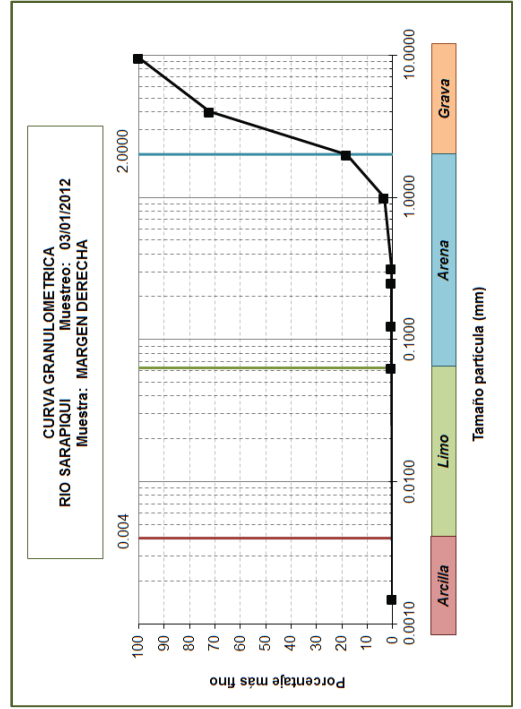
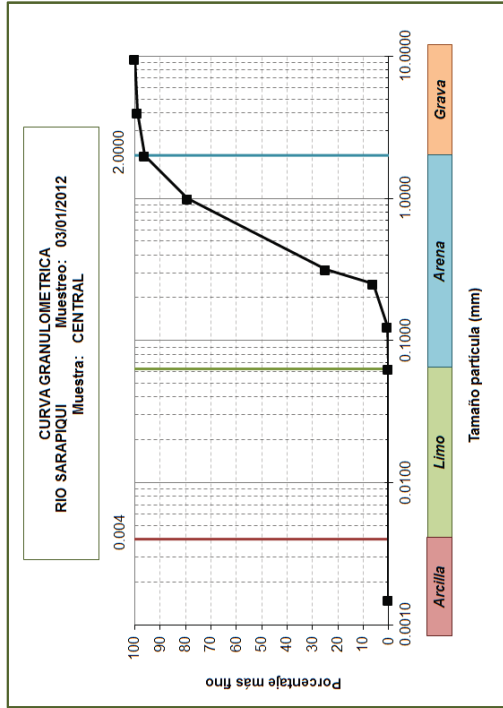
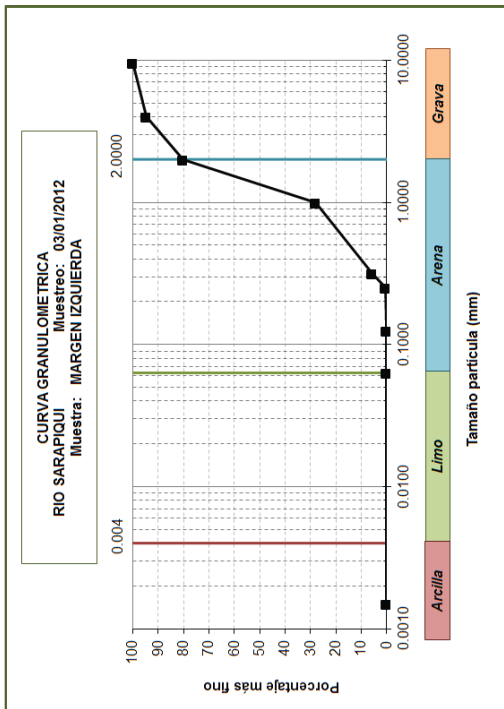


# Embouchure du fleuve Sarapiquí

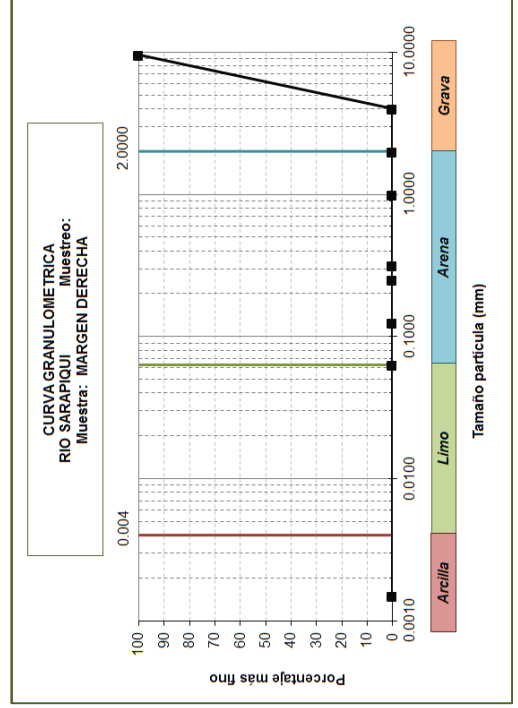
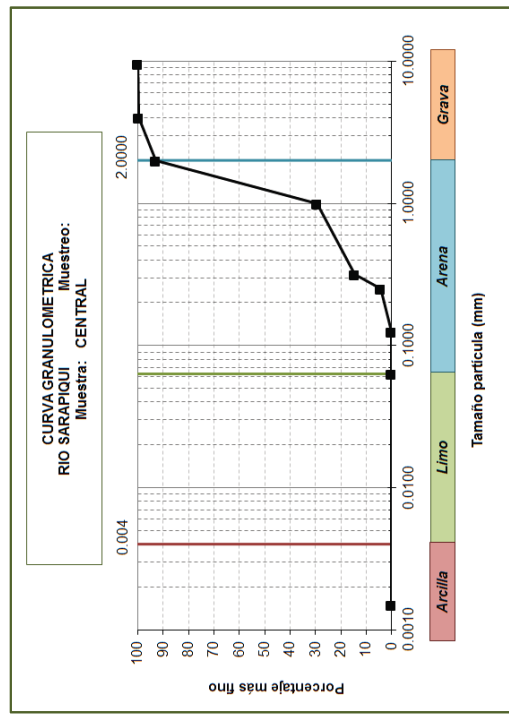
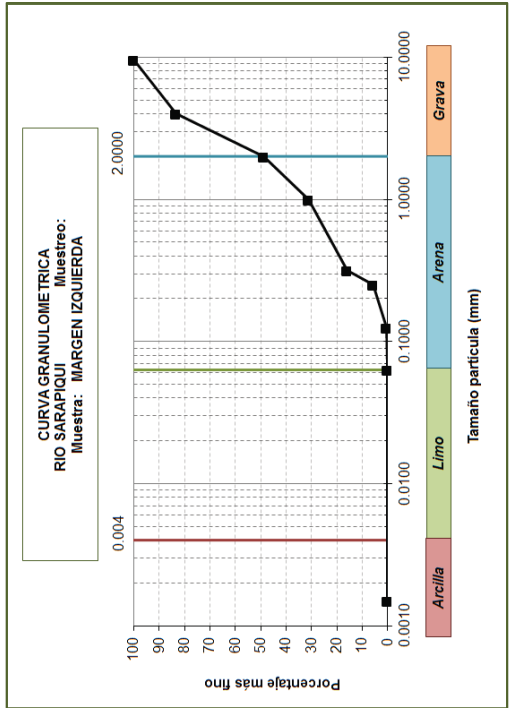
## 22 novembre 2011



# Embouchure du fleuve Sarapiquí 3 janvier 2012

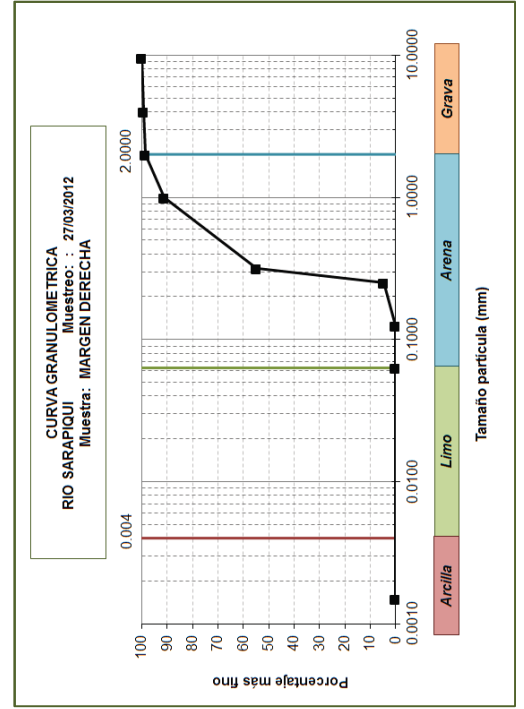
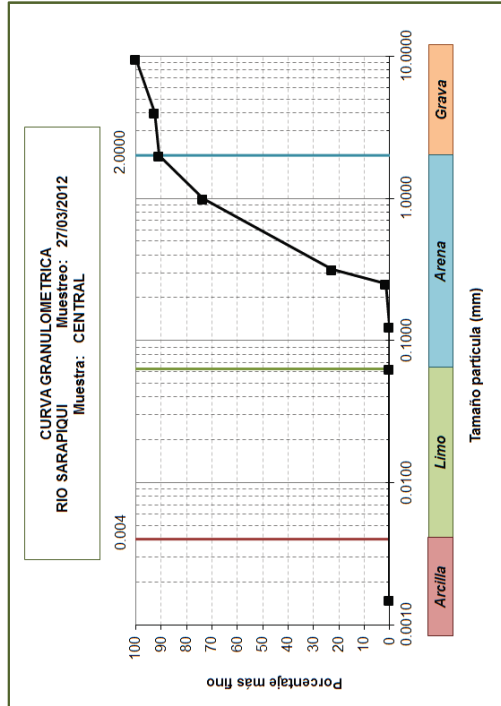
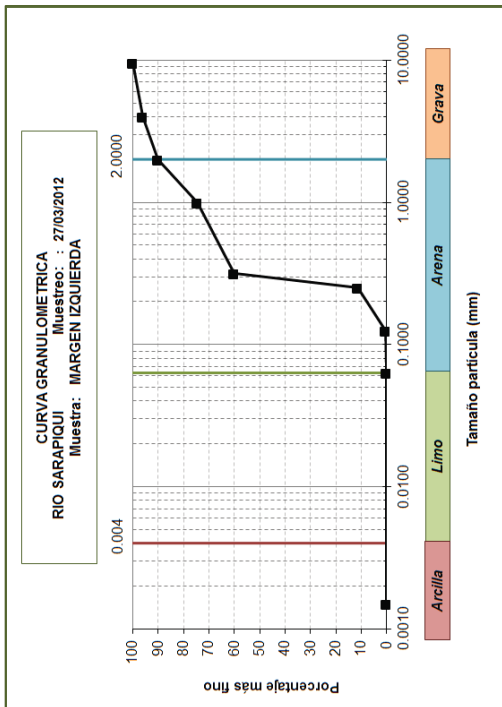


# Embouchure du fleuve Sarapiquí 21 février 2012



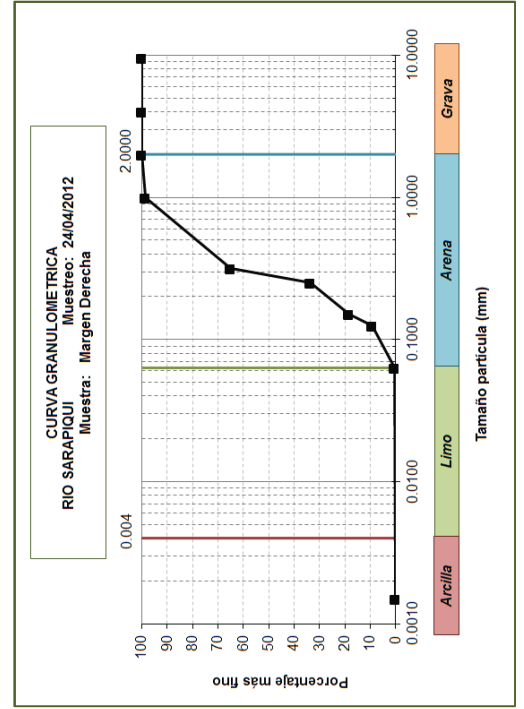
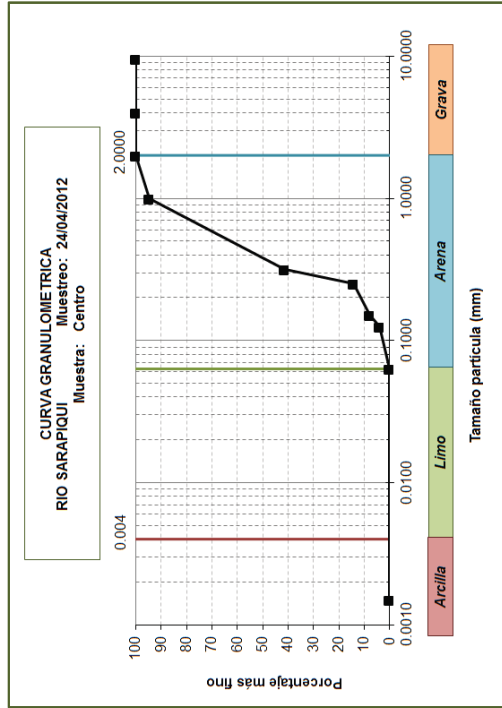
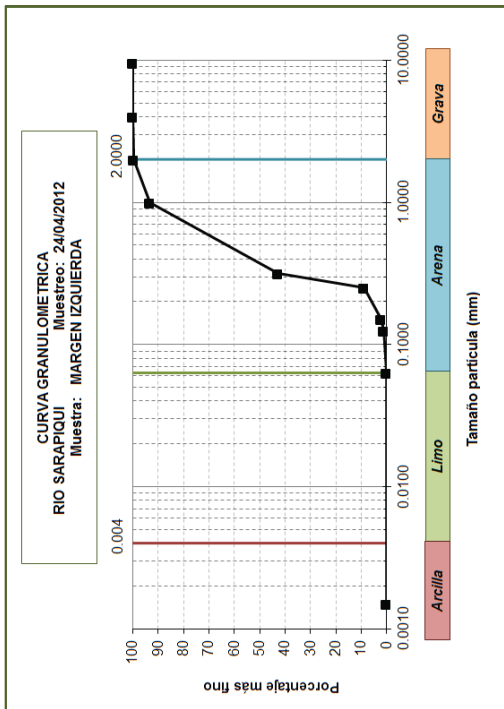
# Embouchure du fleuve Sarapiquí

## 27 mars 2012



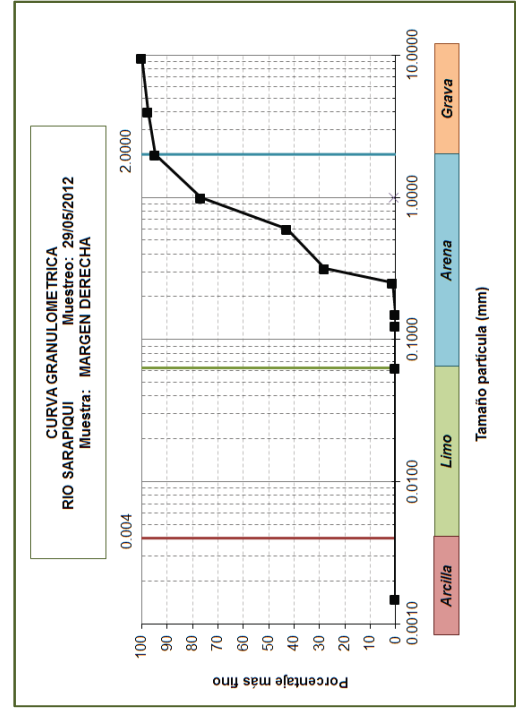
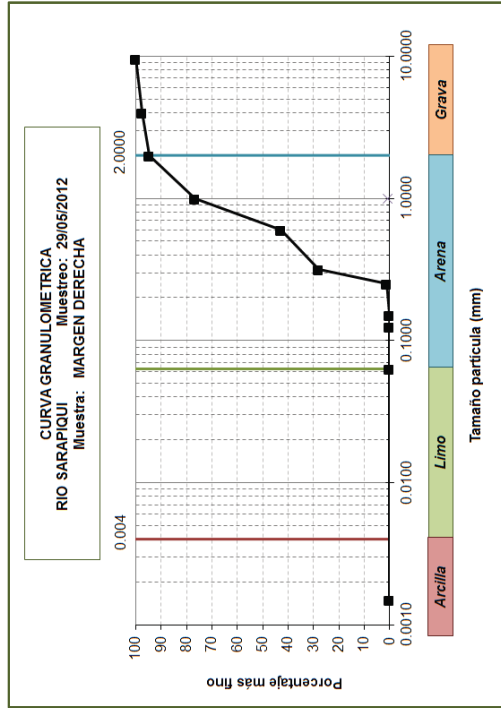
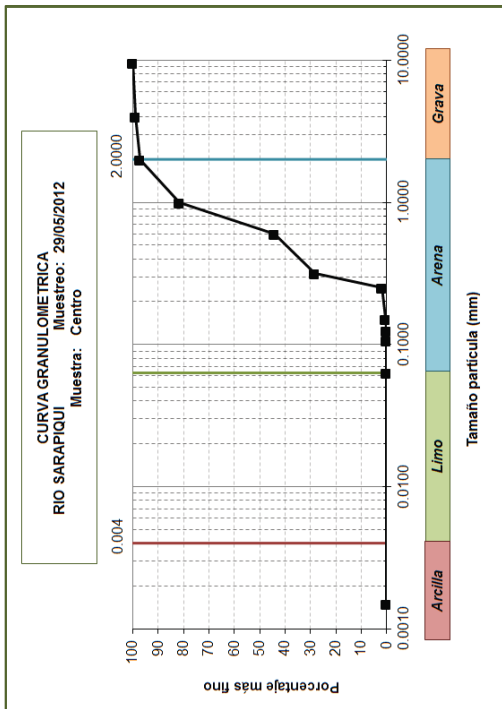
# Embouchure du fleuve Sarapiquí

## 26 avril 2012

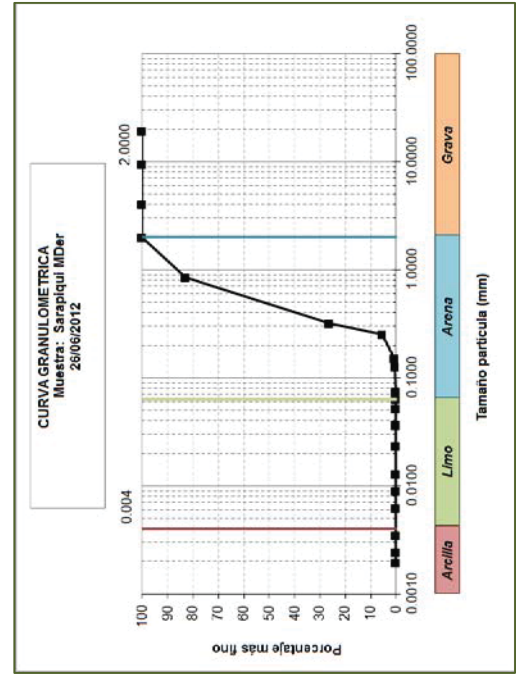
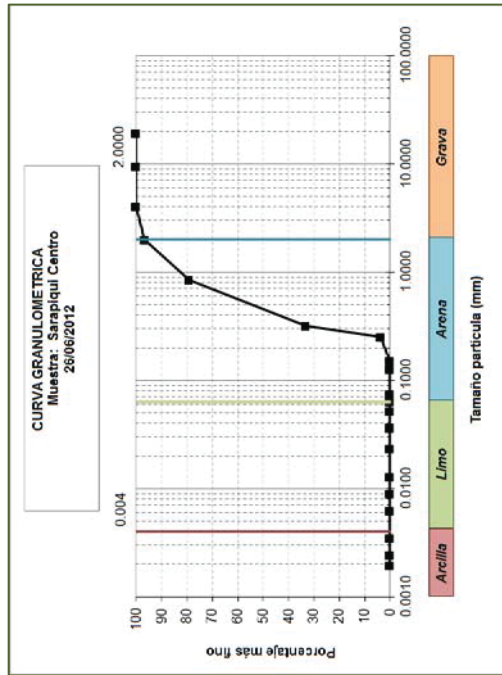
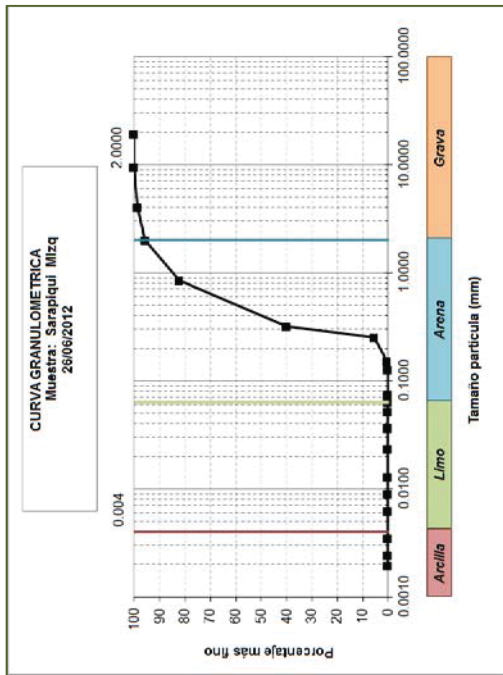




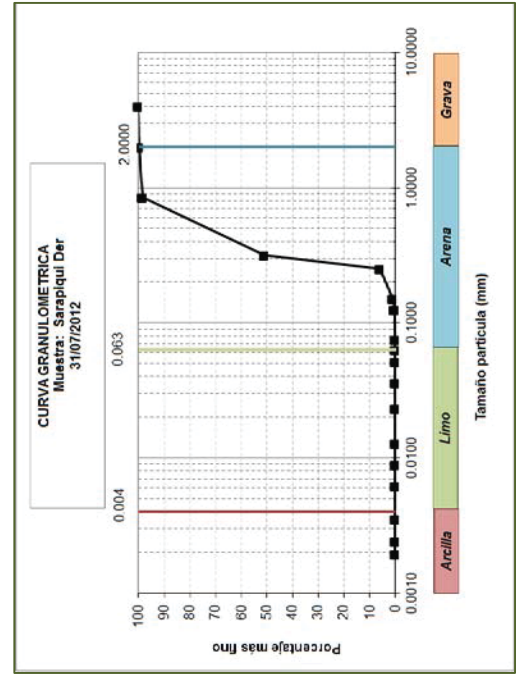
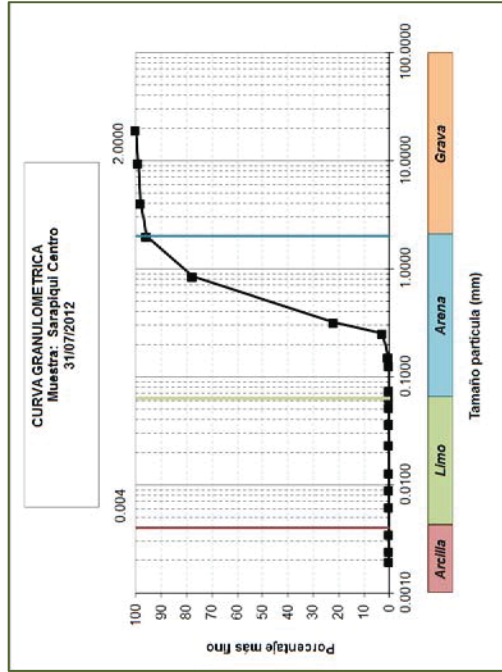
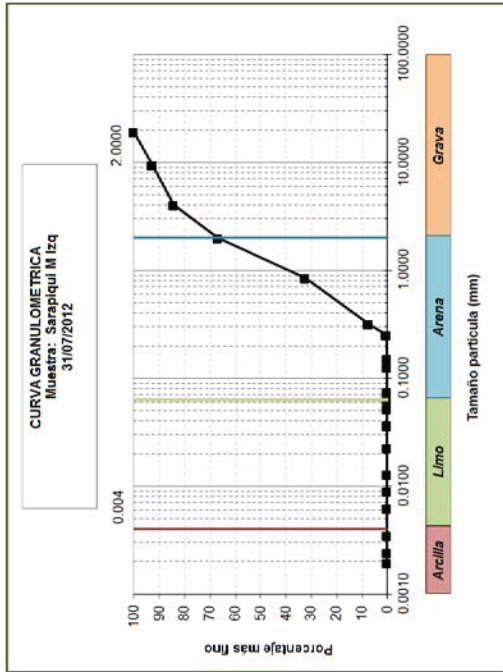
# Embouchure du fleuve Sarapiquí 29 mai 2012



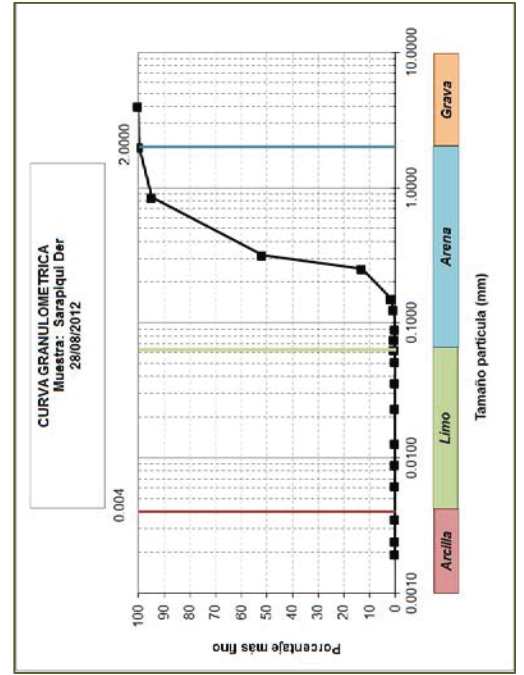
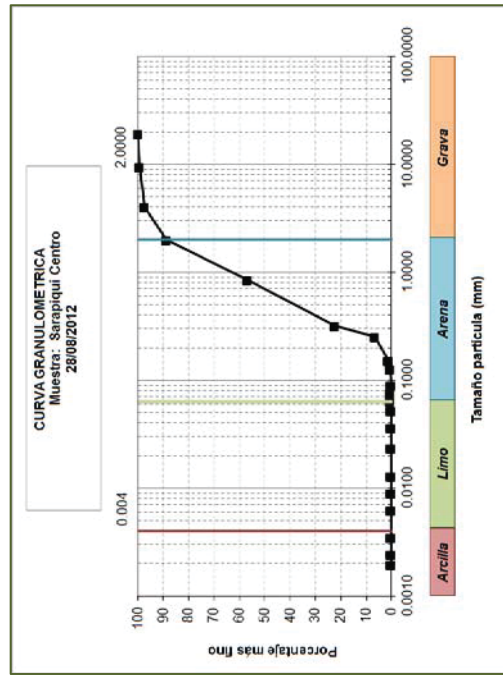
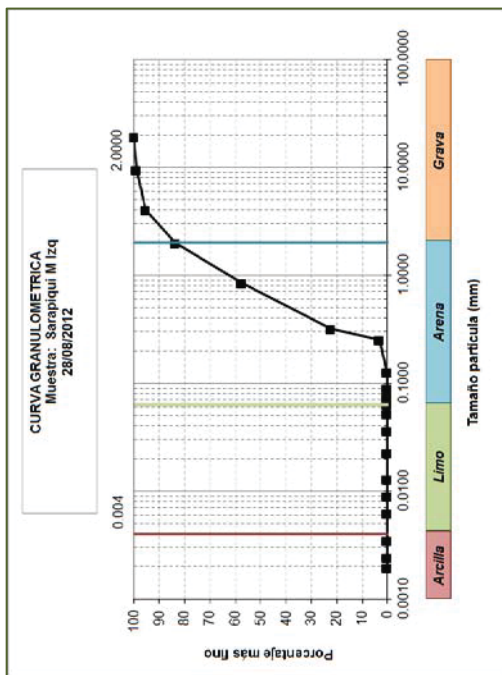
# Embouchure du fleuve Sarapiquí 28 juin 2012



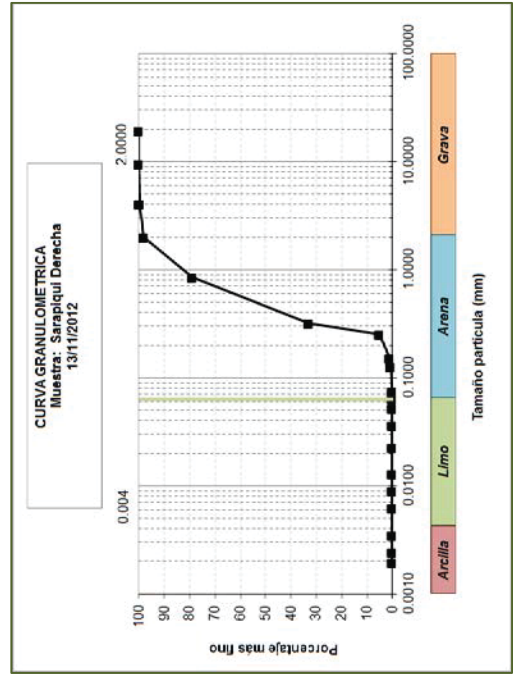
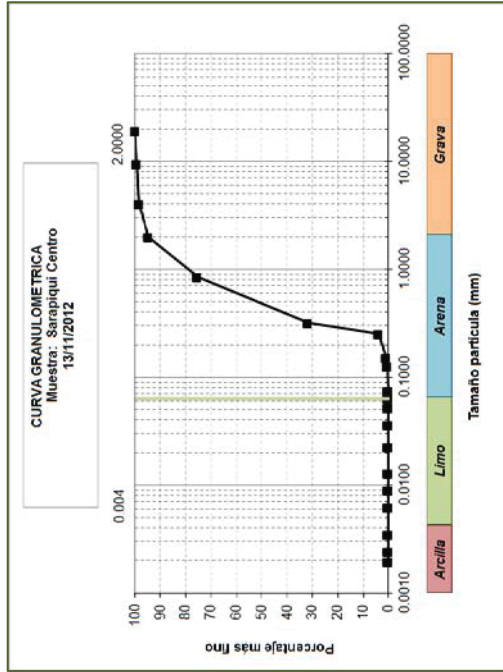
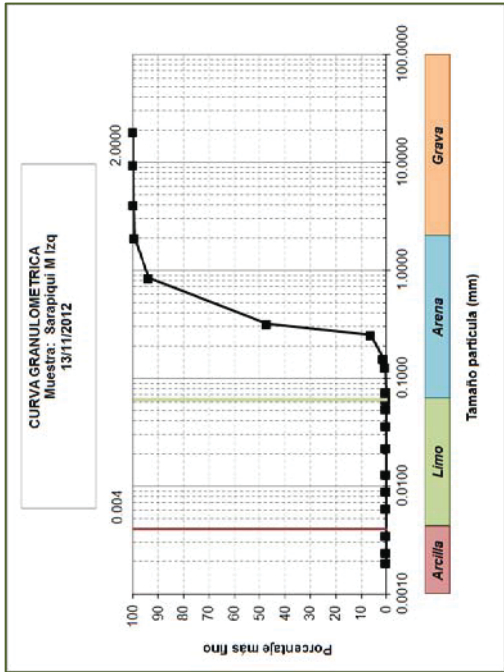
# Embouchure du fleuve Sarapiquí 31 juillet 2012



# Embouchure du fleuve Sarapiquí 28 août 2012

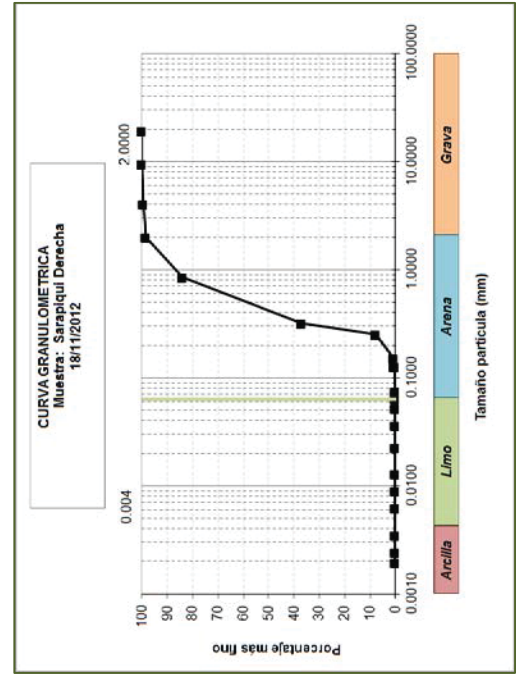
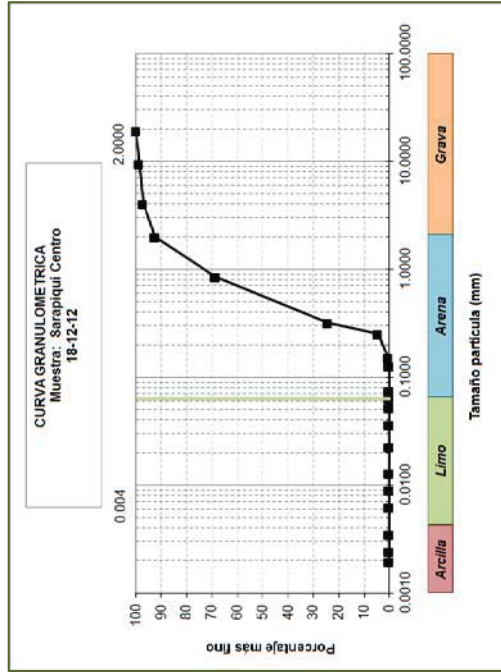
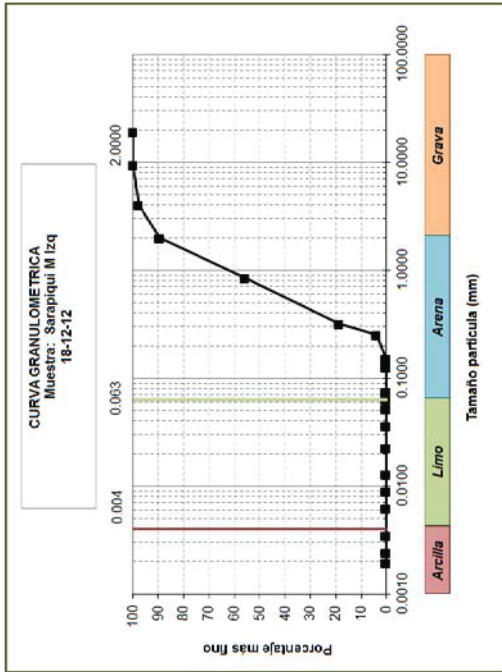


# Embouchure du fleuve Sarapiquí 13 novembre 2012





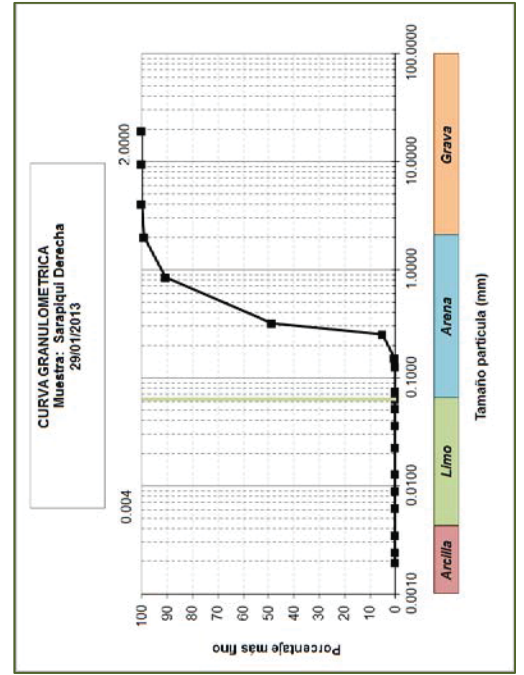
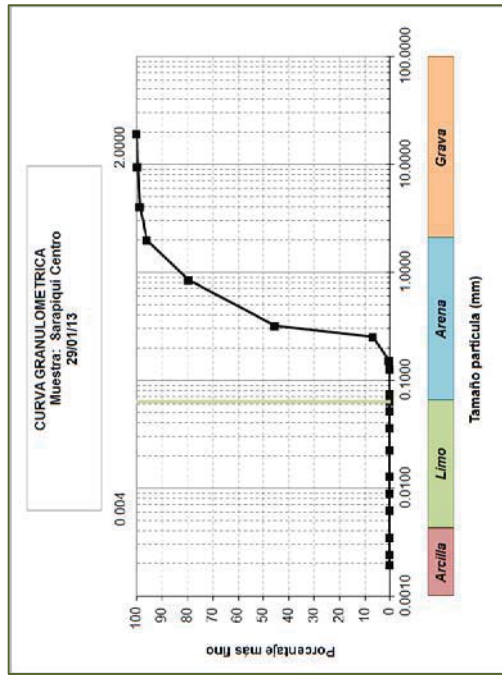
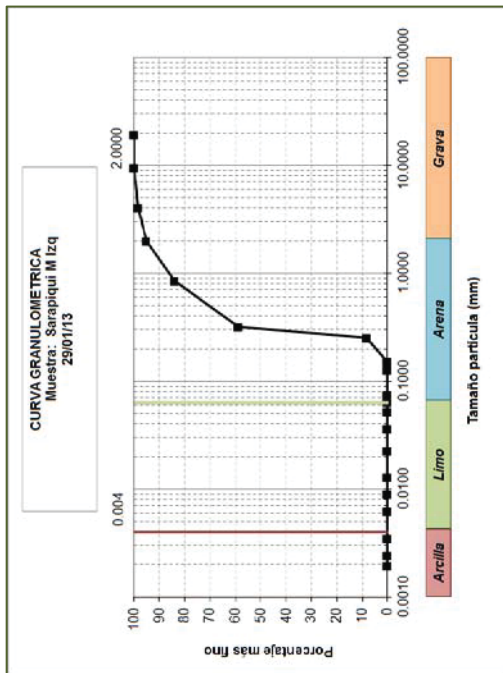
# Embouchure du fleuve Sarapiquí 18 décembre 2012



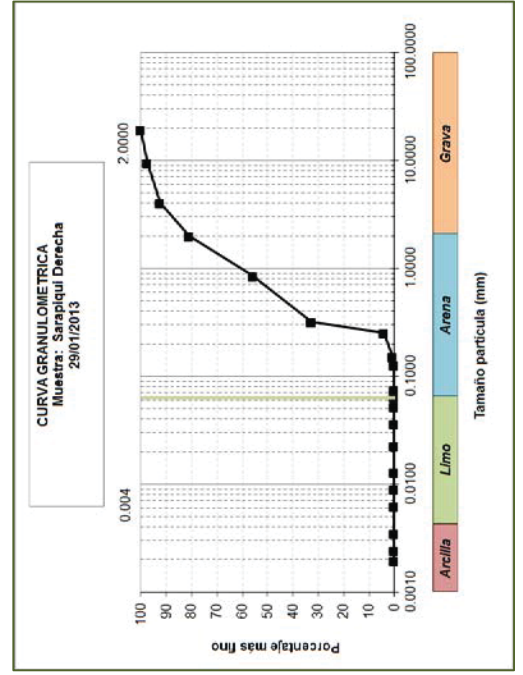
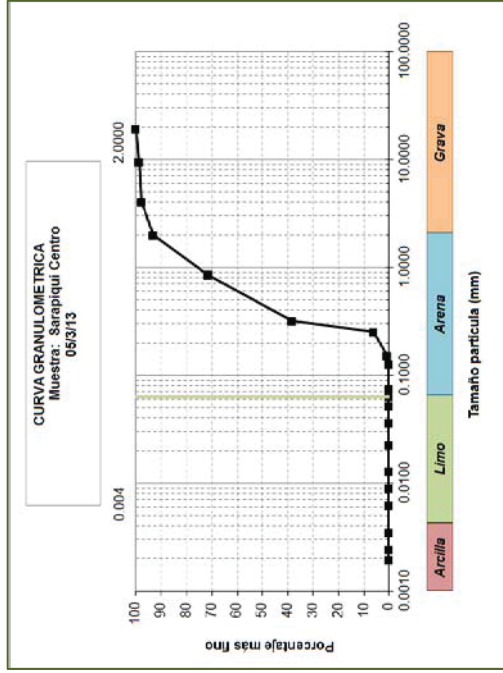
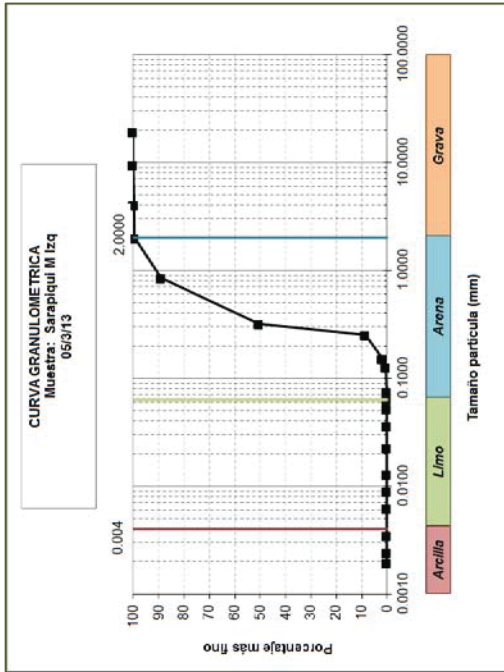


# Embouchure du fleuve Sarapiquí

## 29 janvier 2013

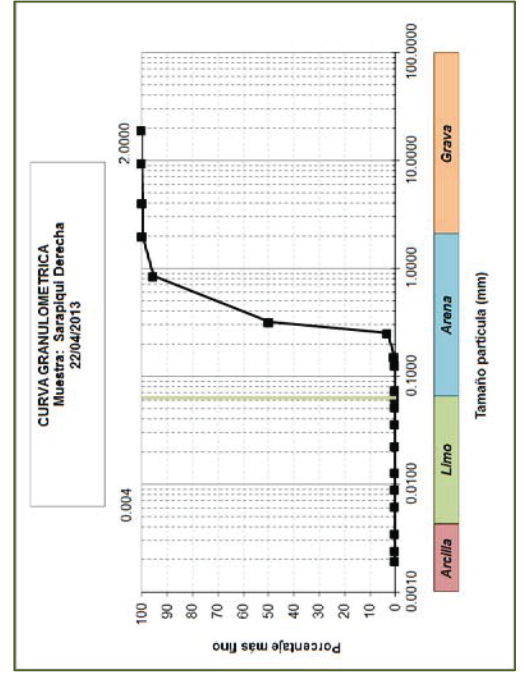
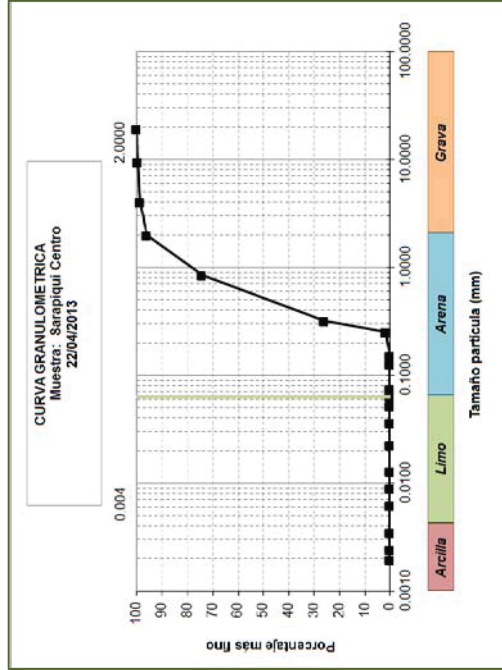
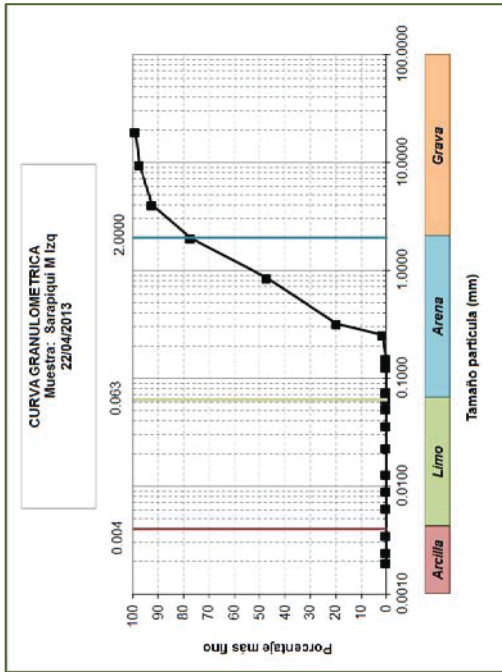


# Embouchure du fleuve Sarapiquí 5 mars 2013

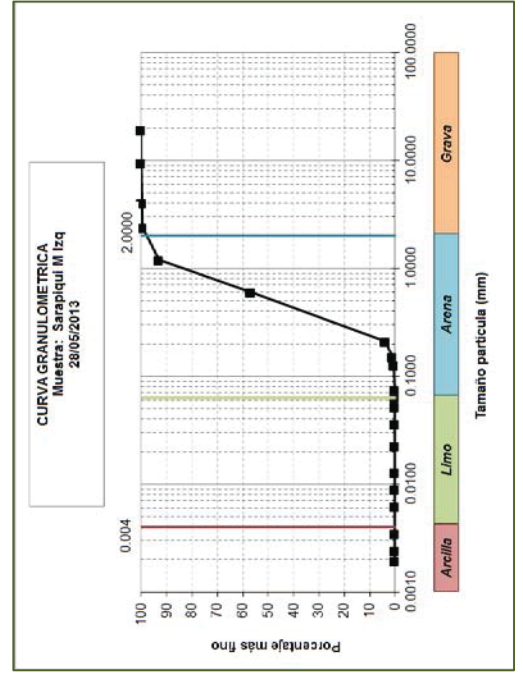
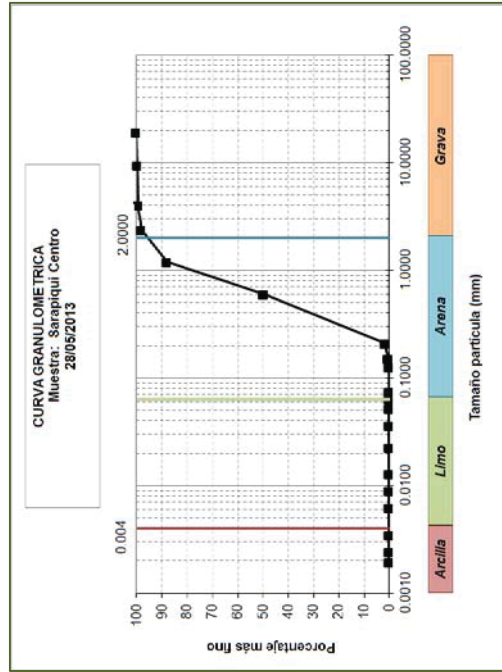
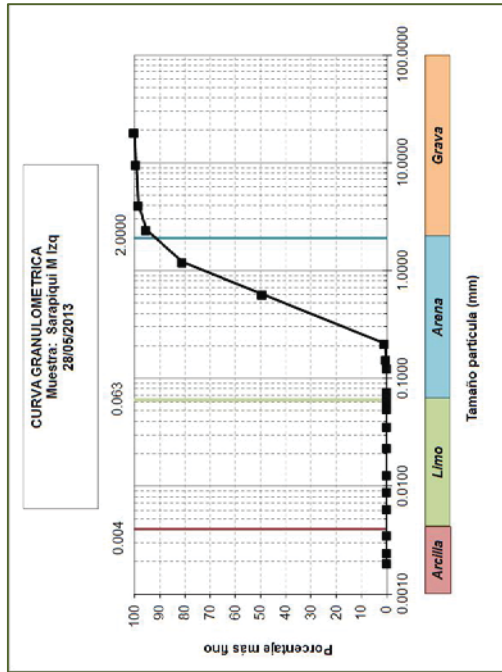


# Embouchure du fleuve Sarapiquí

## 22 avril 2013



# Embouchure du fleuve Sarapiquí 28 mai 2013







APPENDICE F

**RÉPARTITION DES GRAINS DE TAILLE MOYENNE SUR LE LIT DU FLEUVE ET POURCENTAGE DE SABLE DANS DES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS ENTRE DÉCEMBRE 2010 ET JUIN 2013 À LA HAUTEUR DE LA STATION DELTA COLORADO (11-04)**

**Répartition des grains de taille moyenne et pourcentage de sable à delta Costa Rica**

**Station hydrologique 11-04 (Delta Colorado). Échantillons prélevés en décembre 2010.**

Échantillon	Date	d50 (mm)	% de sable
1	14/12/2010	0.10	60
2	14/12/2010	0.15	80
3	01/03/2011	0.25	100
4	01/03/2011	0.40	100
5	01/03/2011	0.65	100
6	01/03/2011	0.75	90
7	01/03/2011	0.70	90
8	03/03/2011	0.35	90
9	03/03/2011	0.50	90
10	03/03/2011	0.70	90
11	03/03/2011	0.70	90
12	03/03/2011	0.40	97
13	05/04/2011	0.30	100
14	05/04/2011	0.60	92
15	05/04/2011	0.65	95
16	05/04/2011	0.30	90
17	05/04/2011	0.75	80
18	06/07/2011	0.30	100
19	06/07/2011	0.50	85
20	06/07/2011	0.40	95
21	06/07/2011	0.35	100
22	06/07/2011	0.35	97
23	30/07/2011	0.40	90
24	30/07/2011	0.30	97
25	30/07/2011	0.40	95
26	30/07/2011	0.35	97
27	30/07/2011	0.35	92
28	30/07/2011	0.40	90
29	30/08/2011	0.35	87
30	30/08/2011	0.35	87
31	30/08/2011	0.55	92



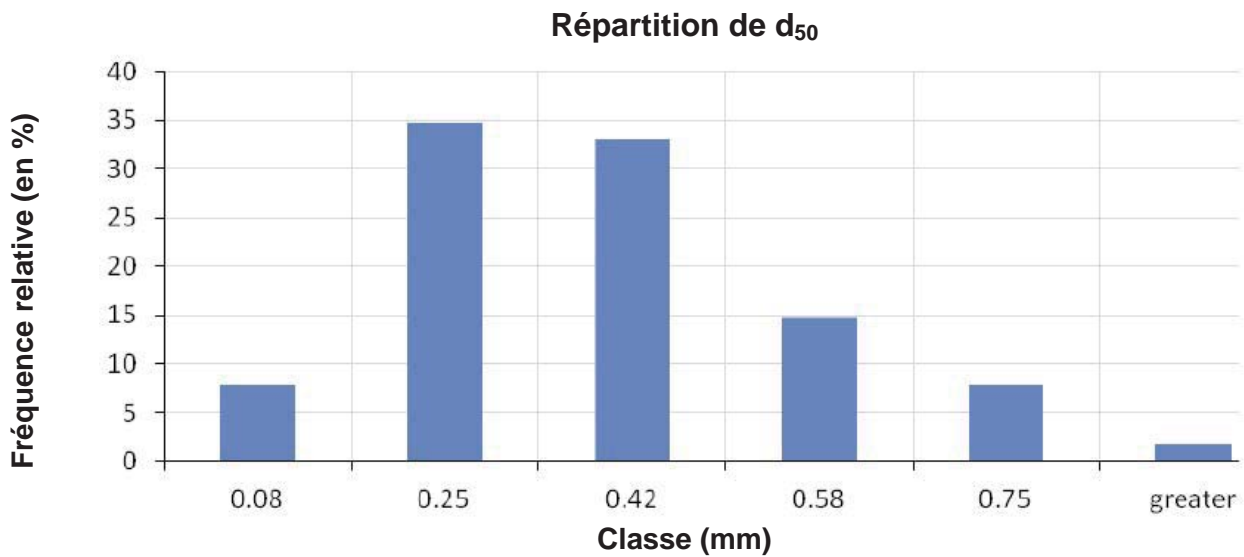
Échantillon	Date	d50 (mm)	% de sable
32	05/10/2011	0.30	100
33	05/10/2011	0.30	100
34	05/10/2011	0.30	100
35	05/10/2011	0.40	100
36	03/11/2011	0.15	93
37	03/11/2011	0.30	100
38	03/11/2011	0.55	87
39	03/11/2011	0.30	100
40	03/11/2011	0.60	92
41	04/01/2012	2.00	22
42	04/01/2012	0.30	100
43	04/01/2012	0.65	87
44	04/01/2012	0.70	87
45	04/01/2012	0.65	97
46	30/01/2012	0.25	100
47	30/01/2012	0.35	92
48	30/01/2012	0.30	95
49	30/01/2012	0.30	100
50	30/01/2012	0.30	100
51	22/02/2012	0.35	90
52	22/02/2012	0.60	85
53	22/02/2012	0.55	67
54	22/02/2012	0.80	100
55	22/02/2012	0.70	80
56	06/03/2012	0.28	100
57	06/03/2012	0.55	87
58	06/03/2012	0.40	97
59	06/03/2012	0.40	90
60	06/03/2012	0.50	90
61	29/03/2012	0.55	95
62	29/03/2012	0.30	97
63	29/03/2012	0.30	100
64	29/03/2012	0.28	97
65	29/03/2012	0.09	68
66	25/04/2012	0.55	100
67	25/04/2012	0.45	92
68	25/04/2012	0.40	95
69	25/04/2012	0.28	97
70	25/04/2012	0.09	85

e sable			
71	30/05/2012	0.09	80
72	30/05/2012	0.30	100
73	30/05/2012	0.25	92
74	30/05/2012	0.25	100
75	30/05/2012	0.10	100
76	27/06/2012	0.50	95
77	27/06/2012	0.30	100
78	27/06/2012	0.30	100
79	27/06/2012	0.08	75
80	27/06/2012	0.75	95
81	01/08/2012	0.25	100
82	01/08/2012	0.25	100
83	01/08/2012	0.30	100
84	01/08/2012	0.50	82
85	01/08/2012	0.18	95
86	29/08/2012	0.20	100
87	29/08/2012	0.25	100
88	29/08/2012	0.55	92
89	29/08/2012	0.50	92
90	29/08/2012	0.15	95
91	14/11/2012	0.30	95
92	14/11/2012	0.40	95
93	14/11/2012	0.28	100
94	14/11/2012	0.35	90
95	14/11/2012	0.50	90
96	19/12/2012	0.30	97
97	19/12/2012	0.30	100
98	19/12/2012	0.30	100
99	19/12/2012	0.30	100
100	19/12/2012	0.50	97
101	22/04/2013	0.50	82
102	22/04/2013	0.50	95
103	22/04/2013	0.40	95
104	22/04/2013	0.50	90
105	22/04/2013	0.28	100
106	28/05/2013	0.30	100
107	28/05/2013	0.45	100
108	28/05/2013	0.60	65
109	28/05/2013	0.60	82
110	28/05/2013	0.60	80

Échantillon	Date	d50 (mm)	% de sable
111	25/06/2013	0.45	97
112	25/06/2013	0.30	100
113	25/06/2013	0.40	97
114	25/06/2013	0.50	97
115	25/06/2013	0.90	90

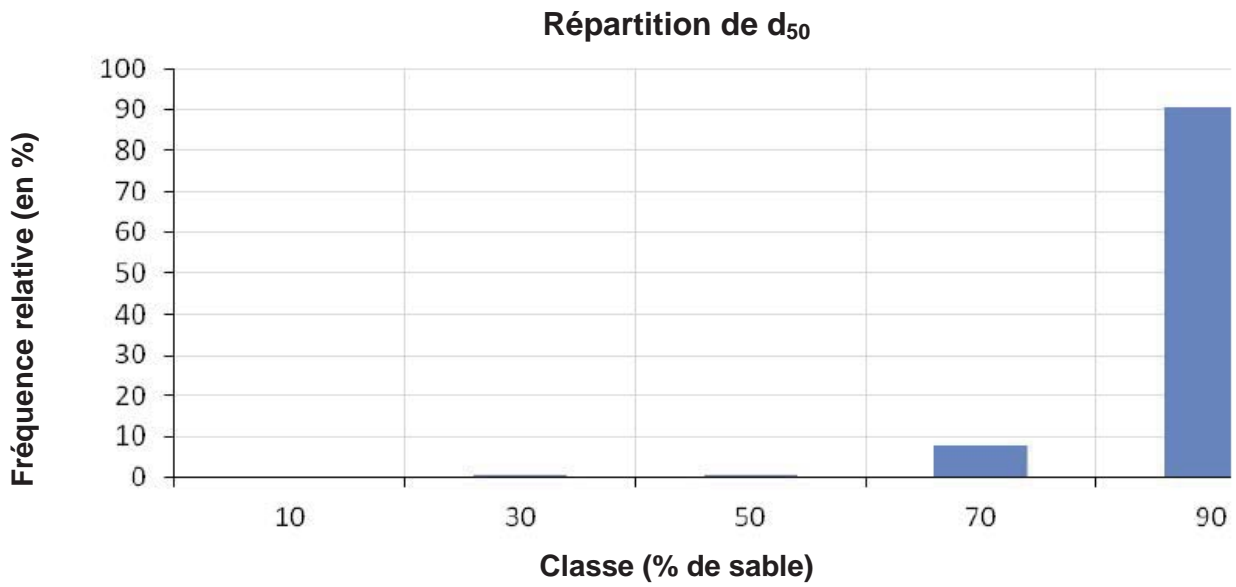
**Fréquence des grains de taille médiane ( $d_{50}$ ) :**

Classe	Fréquence	Fréquence relative (%)
0.08	9	8
0.25	40	35
0.42	38	33
0.58	17	15
0.75	9	8
Plus grand	2	2
Total	115	100



**Répartition de la fréquence du pourcentage de sable (% de sable) :**

<i>Classe</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Fréquence relative (%)</i>
10	0	0
30	1	0
50	1	1
70	9	8
90	104	90
Total	115	100



**APPENDICE G**

**ESTIMATION, SELON LA MÉTHODE EINSTEIN, DE LA CHARGE DE FONDS ANNUELLE POUR  
LA PÉRIODE 2010-2013 DANS LE COURS INFÉRIEUR DU SAN JUAN  
ET DANS LE COLORADO**

Se reporter aux deux fichiers Excel fournis avec le présent rapport et intitulés respectivement :

- «ICE - 11 – Bedload – Einstein – Lower San Juan» ; et
- «ICE – 11 – Bedload – Einstein – Delta Colorado».

APPENDICE H

H.1. DIAGRAMME DE FLUX DE DONNÉES ET DESCRIPTION DU MODÈLE CALSITE

H.2. CARTES D'ENTRÉE ET DE SORTIE PRODUITES POUR DÉTERMINER L'ÉROSION POTENTIELLE ET L'APPORT SOLIDE DANS LES BASSINS DE DRAINAGE COSTA-RICIENS ET NICARAGUAYENS

H.1 Diagramme de flux de données et description du modèle CALSITE

La figure H.1 présente le diagramme de flux de données du modèle CALSITE et explique comment chaque carte interagit avec les autres dans l'estimation de l'érosion du sol et de l'apport solide.

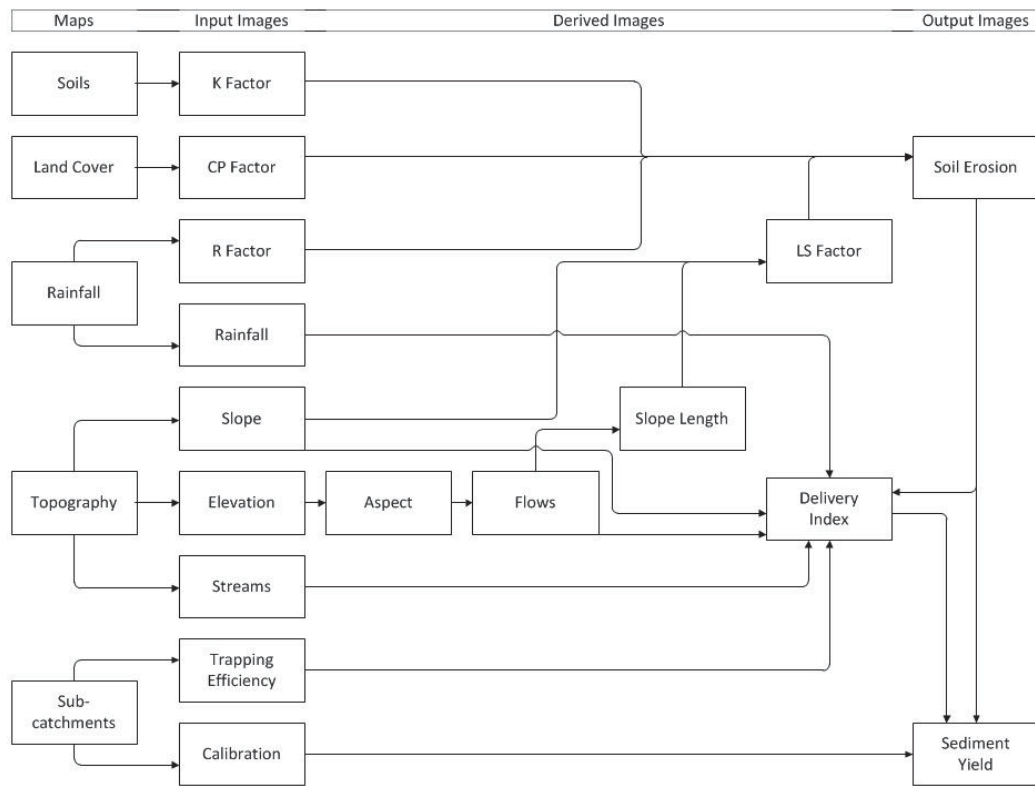


Figure H.1. Diagramme de flux de données du modèle CALSITE.

Calcul de l'indice de débit

L'indice de débit (DI) sert à estimer les ratios de production des sédiments (DR) pour chaque zone :

$$DR = \frac{\text{Sédiments à la sortie du bassin versant}}{\text{Érosion totale du sol}}$$



Les valeurs de l'indice de débit sont converties en un ratio de production des sédiments compris entre 0 et 1, dans le cadre de la procédure de calibrage. L'indice de débit est défini comme suit :

$$DI = \frac{\text{Capacité de transport}}{\text{Volume de sédiments}}$$

Par conséquent, en présence d'une capacité de transport élevée et d'un faible volume de sédiments, la valeur *DI* très élevée indique que tous les sédiments disponibles seront charriés. En présence à la fois d'une capacité de transport élevée et d'un fort volume de sédiments, les valeurs de *DI* seront intermédiaires en raison de la possibilité que la capacité soit trop faible pour charrier tout l'apport solide. Lorsque le volume de sédiments est élevé et que la capacité de transport est faible, *DI* prend une valeur très petite.

L'équation servant à déterminer la valeur de *DI* se définit sur la base des études empiriques menées par Amphlet et Dickinson (1989), ainsi que d'études en laboratoire menées par Govers (1990).

$$DI = \frac{P_a^{2.32} \cdot \min \{F^{0.66} S^{1.44}\}}{SE}$$

où :

- SE = érosion du sol,
- Pa = niveau des précipitations annuelles en mm
- F = nombre de circuits d'écoulement convergents
- S = pente en degrés
- Min = valeur minimum sur le circuit d'écoulement

### Procédure de calibrage

Le calibrage de l'apport solide (*SY*) repose sur l'hypothèse que, dans l'équation :

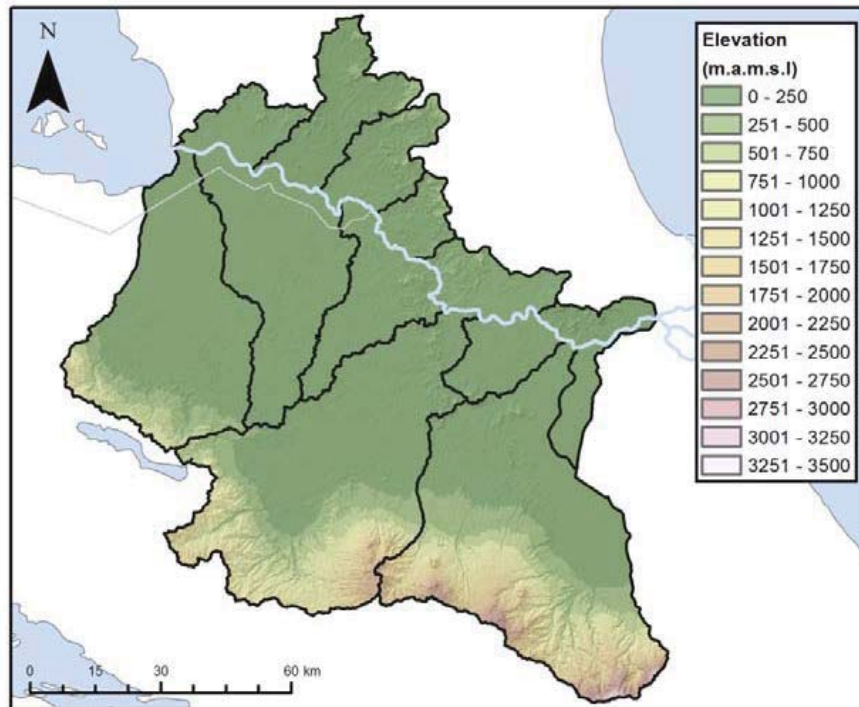
$$SY = SE * DR$$

La procédure de calibrage manipule par conséquent les valeurs de *DR* de l'ensemble de la zone étudiée jusqu'à l'obtention d'un ajustement approprié entre l'apport solide observé et prévu. Il faut d'abord calculer le *DI*, puis le convertir en valeurs *DR* à l'aide de la procédure de calibrage.

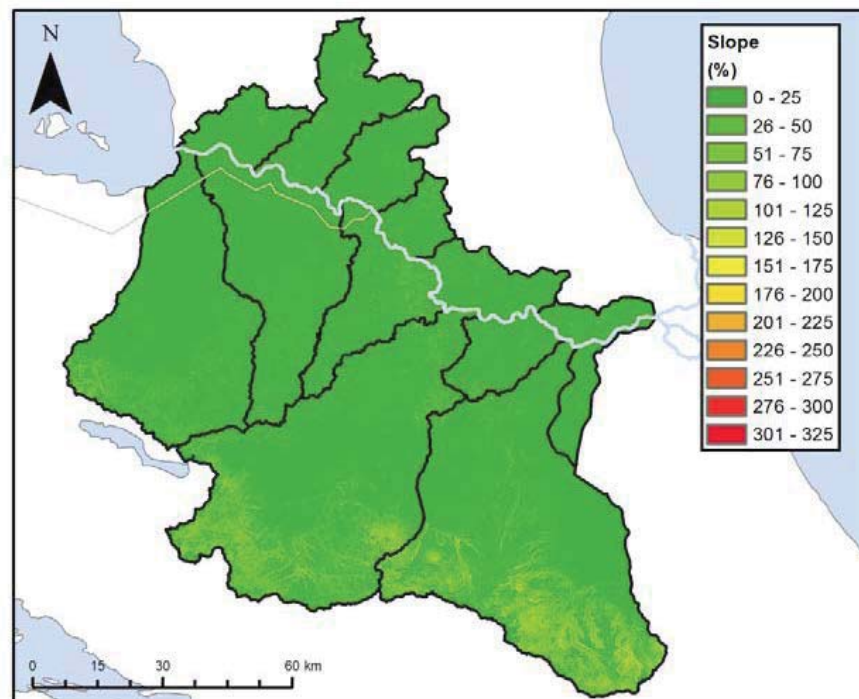
Pour calculer la fonction de dépôt de sédiments dans le fleuve, il a été supposé que le matériau érodé se compose d'une seule taille de grains dans la mesure où un seuil unique a été choisi. Le matériau érosif se compose de fractions granulométriques englobant de nombreux ordres de grandeur. Par conséquent, si la valeur seuil peut être dépassée pour les matériaux les plus fins et si le *DR* sert d'unité, les matériaux grossiers sont beaucoup moins susceptibles de transport ce qui pourrait limiter les quantités atteignant le réseau fluvial.

La fonction de dépôt de sédiments d'une taille granulométrique unique génère une courbe revêtant une autre forme. Cette forme a été déduite sur la base des deux hypothèses suivantes : a) le matériau subissant l'érosion est réparti de manière égale sous l'angle de la vitesse de sédimentation, puisqu'il consiste en particules allant d'un grain d'argile à un grain de sable d'un diamètre d'environ 1 mm ; b) la capacité de transport de l'eau est inversement proportionnelle à la vitesse de sédimentation comme indiqué par Westrich et Jurashek (1985).

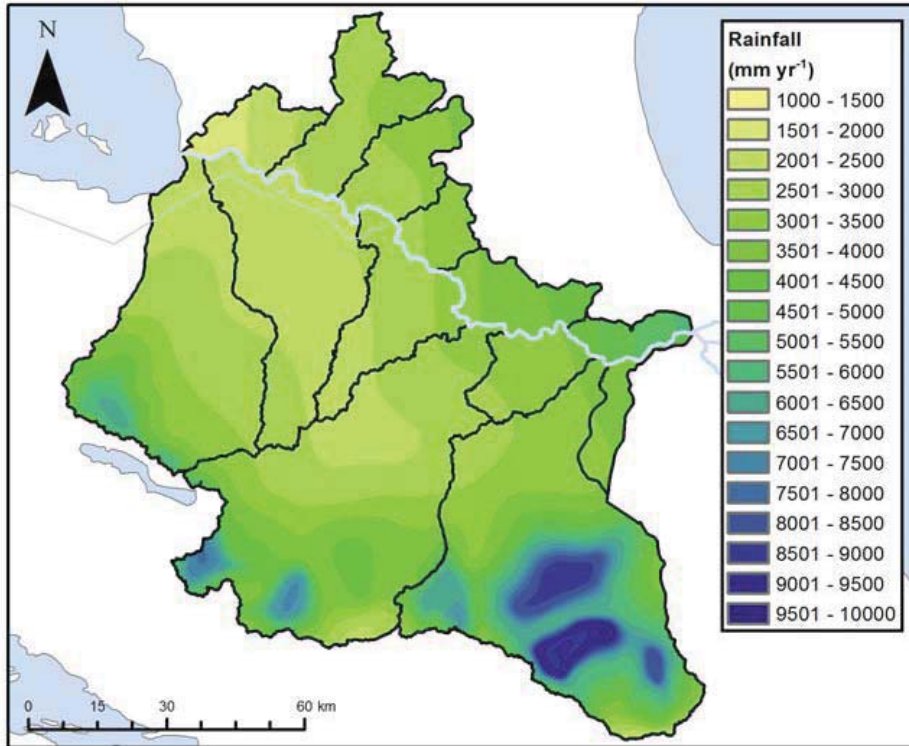
## H.2 Cartes d'entrée et de sortie



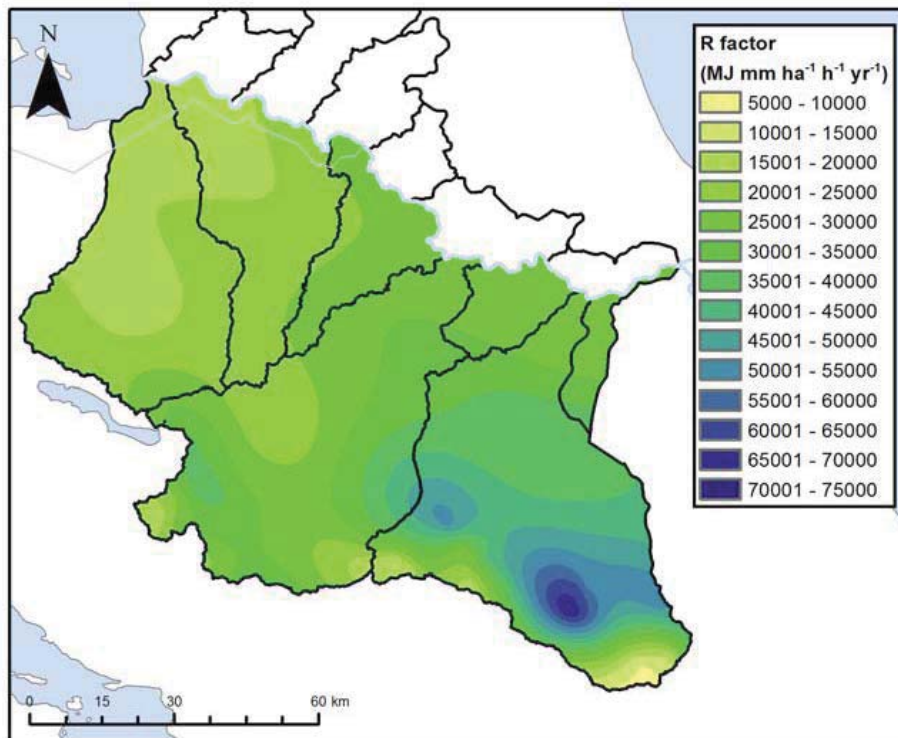
**Figure H.2.** Modèle numérique d'élévation des principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.



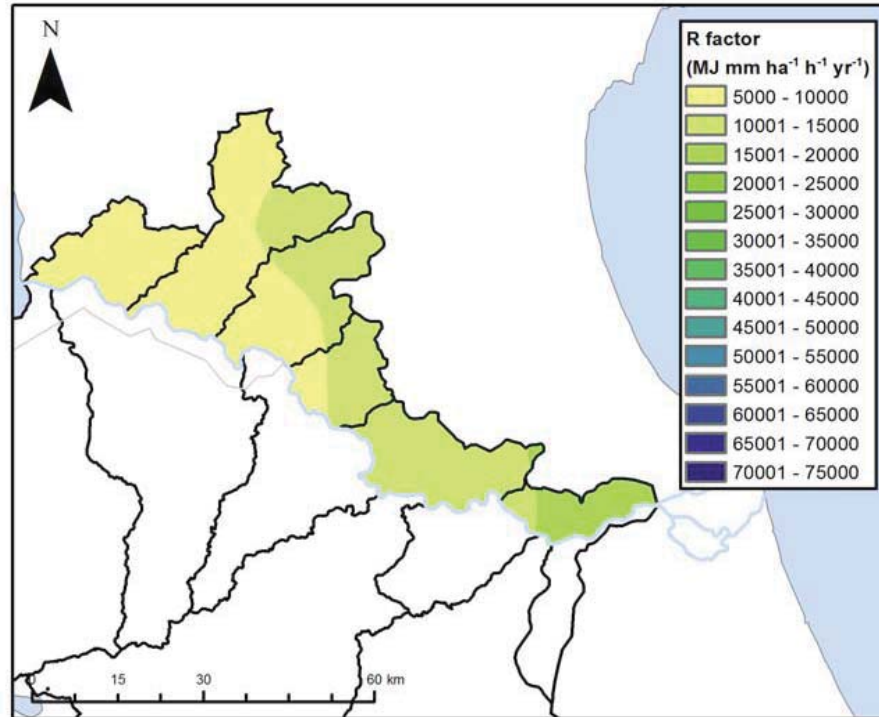
**Figure H.3.** Carte de déclivité des principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.



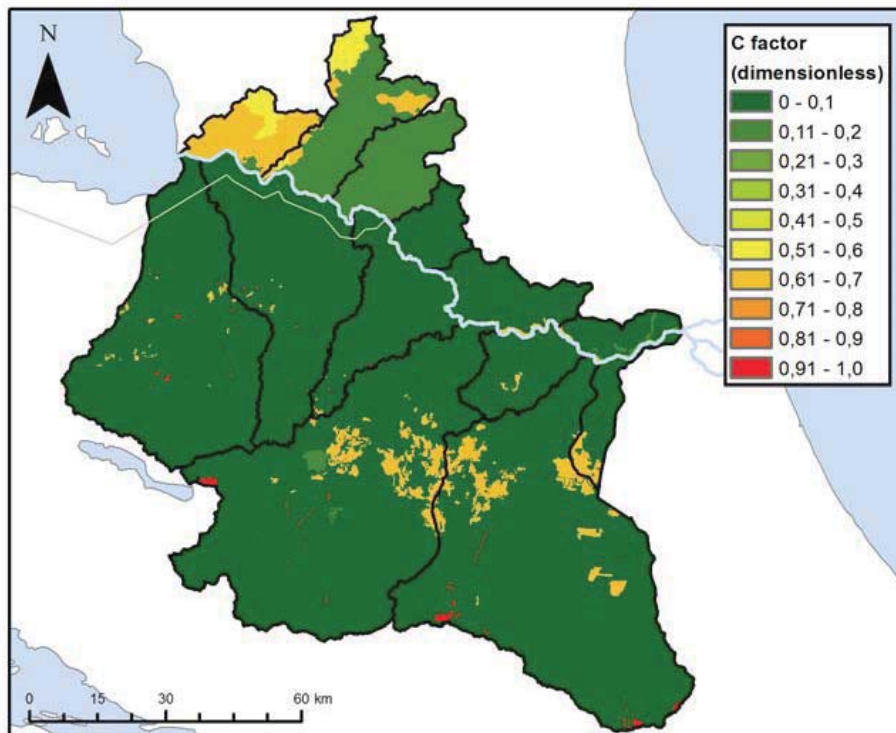
**Figure H.4.** Carte des précipitations annuelles moyennes pour les principaux bassins fluviaux costa-riens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.



**Figure H.5.** Carte du facteur *R* pour les principaux bassins fluviaux costa-riens se déversant dans le San Juan.

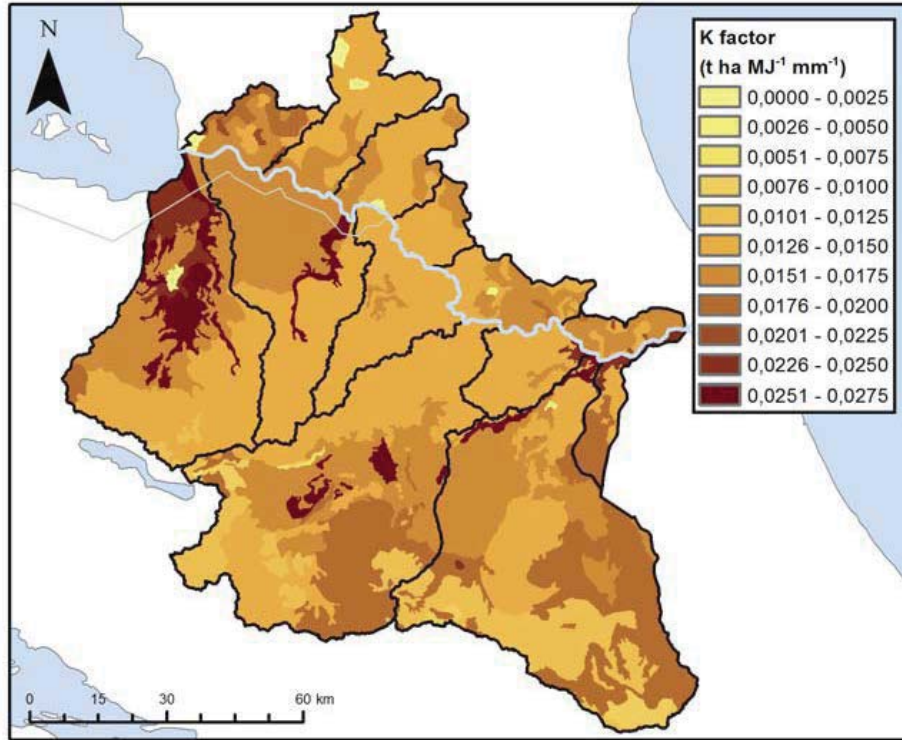


**Figure H.6.** Carte du facteur *R* pour les principaux bassins fluviaux nicaraguayens se déversant dans le San Juan.

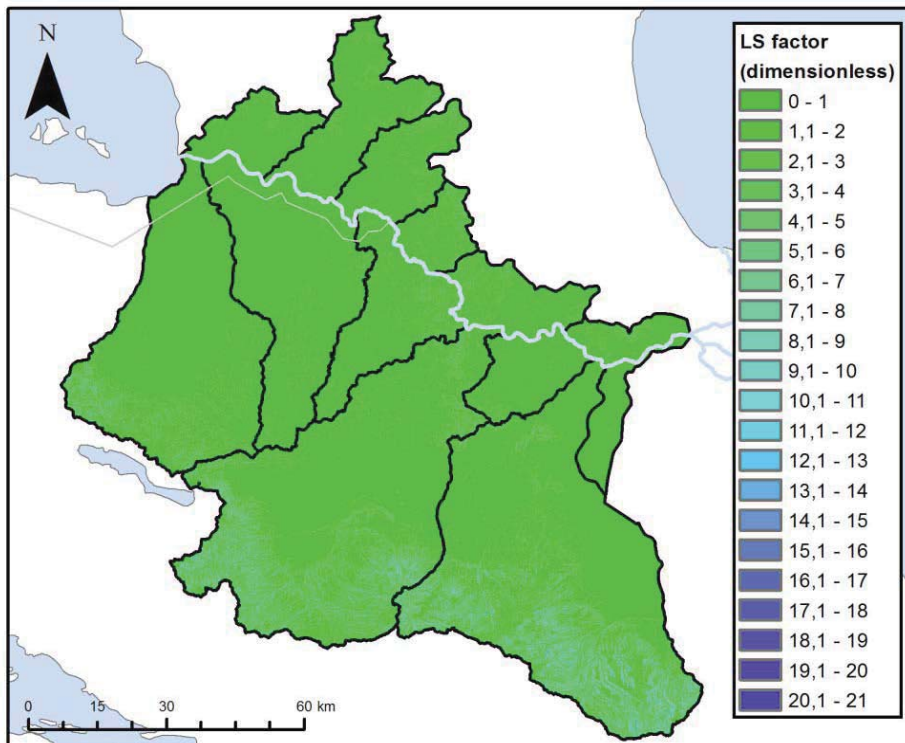


**Figure H.7.** Carte du facteur *C* pour les principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.

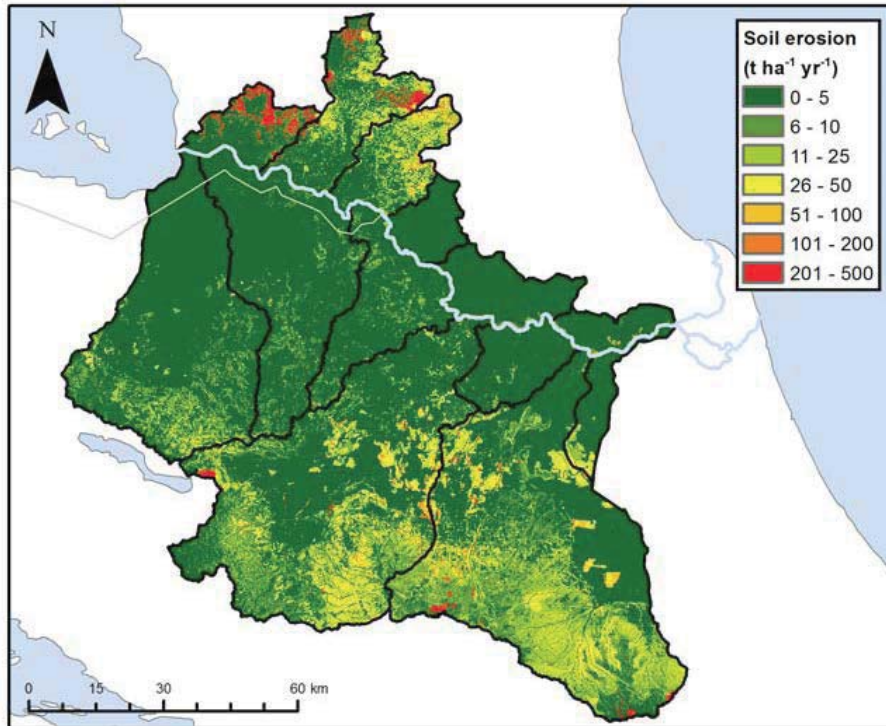




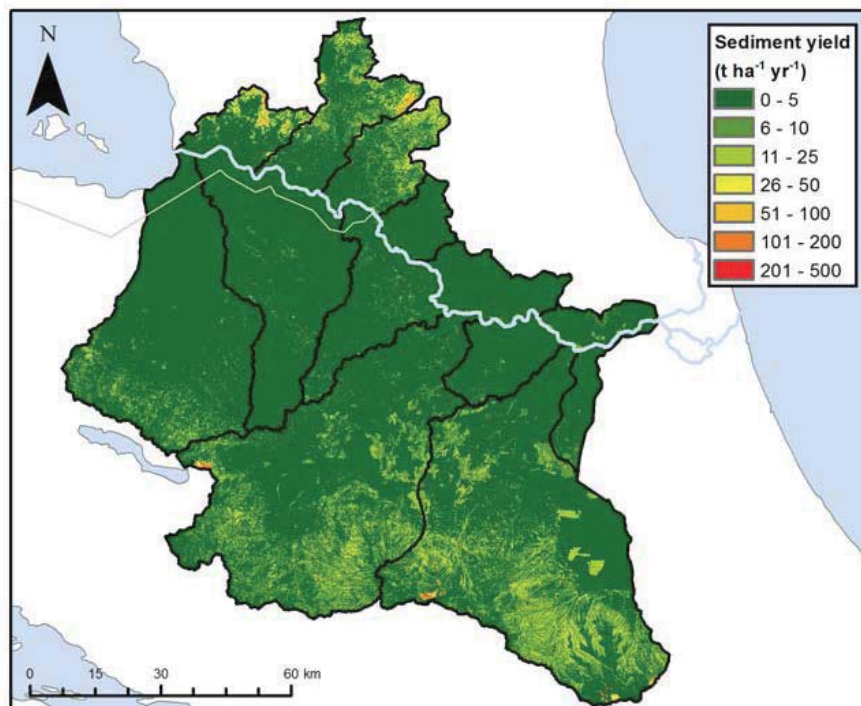
**Figure H.8.** Carte du facteur *K* pour les principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.



**Figure H.9.** Carte du facteur *LS* pour les principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.



**Figure H.10.** Carte de l'érosion potentielle des principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.



**Figure H.11.** Carte de l'apport solide spécifique pour les principaux bassins fluviaux costa-riciens et nicaraguayens se déversant dans le San Juan.

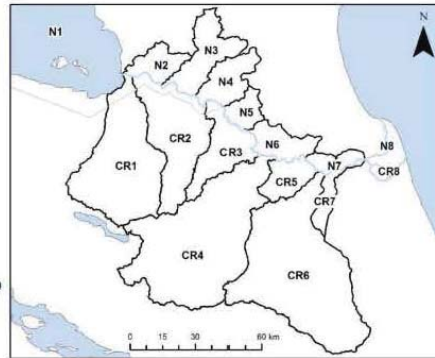
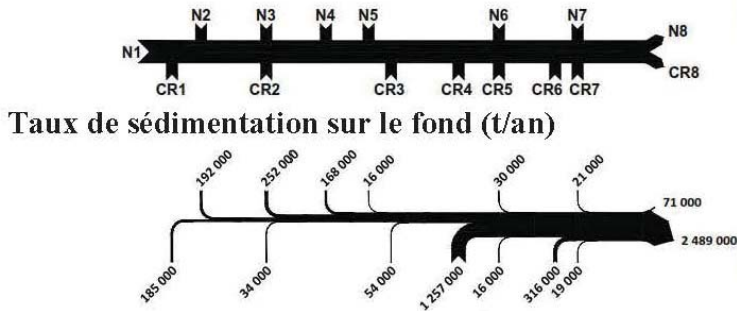


APPENDICE I

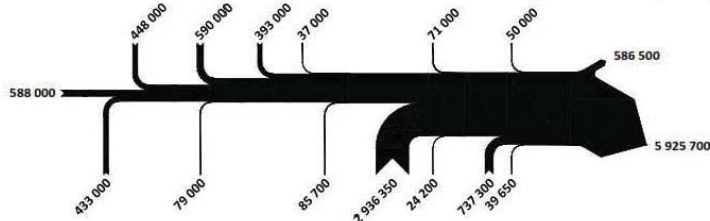
DIAGRAMMES VENTILÉS PAR COMPOSANTS DE L'APPORT SOLIDE DU BILAN SÉDIMENTAIRE  
DANS LE SYSTÈME FLUVIAL SAN JUAN - COLORADO AVANT ET APRÈS LA CONSTRUCTION  
DE LA ROUTE 1856

I.1. Bilan sédimentaire ventilé par composants de la charge solide dans le  
système fluvial San Juan - Colorado avant la construction de la route 1856

Économie générale



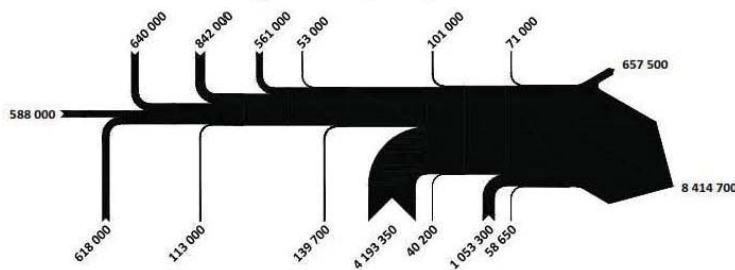
**Taux de sédimentation de sédiments en suspension (t/an)**



Symboles :

- N1: Lac Nicaragua
- N2: Bassin de la Melchora
- N3: Bassin du Sábalos
- N4: Bassin du Santa Cruz
- N5: Bassin du Bartola
- N6: Bassin du Machado
- N7: Bassin de Las Banderas
- N8: Cours inférieur du San Juan

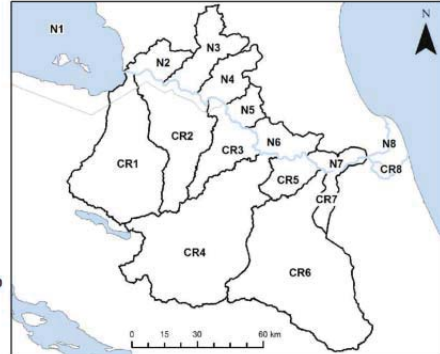
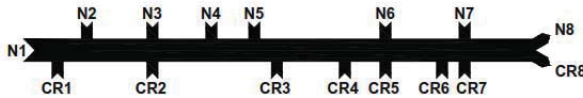
**Taux de sédimentation général (t/an)**



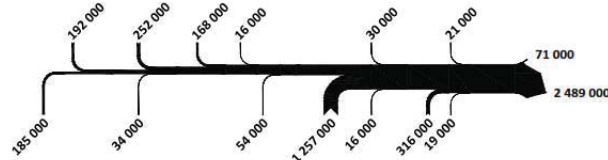
- CR1 : Bassin du Frío
- CR2 : Bassin du Pocosol
- CR3 : Bassin de l'Infiernito
- CR4 : Bassin du San Carlos
- CR5 : Bassin de la Cureña
- CR6 : Bassin du Sarapiquí
- CR7 : Bassin du Chirripó
- CR8 : Fleuve Colorado

## I.2. Bilan sédimentaire ventilé par composants de la charge solide dans le système fluvial San Juan - Colorado après la construction de la route 1856

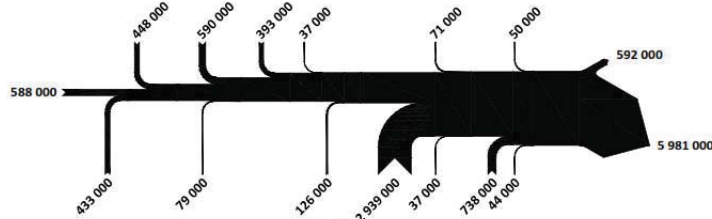
### Économie générale



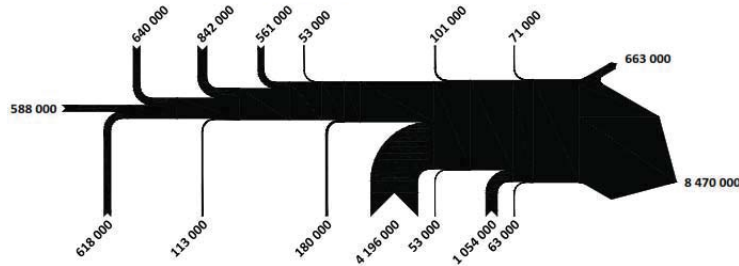
### Taux de sédimentation sur le fond (t/an)



### Taux de sédimentation de sédiments en suspension (t/an)



### Taux de sédimentation général (t/an)



Symboles :

- N1: Lac Nicaragua
- N2: Bassin de la Melchora
- N3: Bassin du Sábalo
- N4: Bassin du Santa Cruz
- N5: Bassin du Bartola
- N6: Bassin du Machado
- N7: Bassin de Las Banderas
- N8: Cours inférieur du San Juan

- CR1 : Bassin du Frío
- CR2 : Bassin du Pocosol
- CR3 : Bassin de l'Infiernito
- CR4 : Bassin du San Carlos
- CR5 : Bassin de la Cureña
- CR6 : Bassin du Sarapiquí
- CR7 : Bassin du Chirripó
- CR8 : Fleuve Colorado

## ANNEXE 5

### **ANDREAS MENDE, ALLAN ASTORGA G. ET OLIVIER CHASSOT, ROUTE FRONTALIÈRE 1856 : EXAMEN DES 54 SITES OÙ AURAIT ÉTÉ CONSTATÉ LE DÉPÔT DIRECT DE SÉDIMENTS, SELON M. MATHIAS KONDOLF, SEPTEMBRE 2013**

Etabli par :

M. Andreas Mende  
Expert international en systèmes d'information  
géographiques (SIG)

A l'intention de :

Ministère des affaires étrangères  
Gouvernement du Costa Rica

En collaboration avec :

M. Allan Astorga  
Expert international en géologie environnementale et  
gestion des sols

M. Olivier Chassot  
Directeur général du centre de sciences tropicales  
San José, Costa Rica  
Septembre 2013

## 1. INTRODUCTION

Dans l'évaluation qu'ils ont faite des dommages causés à l'environnement par la construction de la route 1856 le long de la frontière entre le Costa Rica et le Nicaragua, M. Mathias Kondolf et ses collègues ont évoqué 54 sites où auraient été constatés dans le fleuve San Juan des dépôts sédimentaires provenant directement de la route (Kondolf *et al.*, 2012) (ci-après, le «rapport Kondolf»).

Le présent rapport présente une analyse détaillée de ces 54 sites, effectuée dans le cadre de missions d'observation conduites sur le terrain en hélicoptère et à bord d'embarcations sur le San Juan afin de vérifier s'il existe des éléments venant confirmer ou infirmer les déclarations de M. Kondolf concernant chacun de ces sites. Aux fins de cette analyse, les coordonnées fournies au Costa Rica par le Nicaragua ont servi de données de référence s'agissant de la localisation des sites.

Dans une autre étude établissant l'inventaire des cours d'eau et des talus liés à la construction de la route 1856, nous avons notamment estimé la quantité annuelle de sédiments produite par un talus donné (Mende *et al.*, 2013). A partir de ces données, nous avons calculé la quantité maximale de sédiments qui pourraient se déverser chaque année dans le San Juan sur chacun des sites mentionnés dans le rapport Kondolf. Il convient de préciser que ces estimations, obtenues en additionnant les volumes sédimentaires générés par l'ensemble des talus dont les eaux sont susceptibles d'être drainées vers le site concerné, correspondent à l'hypothèse la plus pessimiste où la totalité des sédiments produits atteindrait le San Juan, scénario qui ne pourrait se réaliser que dans des circonstances exceptionnelles.

Il convient par ailleurs de préciser que sept des sites mentionnés par M. Kondolf sont en fait situés en territoire nicaraguayen. S'agissant de la production sédimentaire, une valeur nulle leur a donc été attribuée, la présente étude portant uniquement sur les sédiments en provenance du Costa Rica. S'il n'est pas exclu que des dépôts présents dans le San Juan puissent être imputables à ces sites, nous n'avons pu établir aucune estimation à cet égard, ayant été dans l'impossibilité de conduire des analyses réelles en territoire nicaraguayen. Pour deux des sites mentionnés (n<sup>os</sup> 36 et 49), où une partie des sédiments charriés dans le San Juan est produite par l'action érosive de certains cours d'eau, nous n'avons pas été en mesure d'estimer la production sédimentaire

maximale liée à la construction de la route, car l'appréciation de la part imputable à l'érosion de ces cours d'eau particuliers nécessiterait une analyse complexe qui n'a pu être réalisée dans le cadre de cette étude.

Pour présenter sous forme de valeurs relatives cohérentes la production sédimentaire maximale de chacun des 54 sites répertoriés par M. Kondolf, nous avons comparé les estimations en valeur absolue au volume sédimentaire total charrié par le fleuve au niveau de chaque site. Ces données sont issues du modèle hydrologique du système fluvial du San Juan établi par la Régie costaricienne d'électricité (*Instituto Costarricense de Electricidad, ICE*) sous la direction de M. Federico Gomez-Delgado (Gomez-Delgado, 2013). La production sédimentaire maximale de la route au niveau de chaque site mentionné par M. Kondolf, exprimée en pourcentage du volume total charrié dans le San Juan en ce point précis, fournit une base raisonnable pour déterminer si l'un quelconque des 54 sites est effectivement susceptible de causer des dommages au fleuve.

Le présent rapport comporte deux parties ; dans la première figurent une carte générale représentant la répartition géographique des 54 sites répertoriés dans le rapport Kondolf, ainsi que 13 cartes détaillées portant plus précisément sur ces sites. Sur ces dernières, réalisées à partir d'une carte d'utilisation des terres établie par MM. Astorga et Mende (2013), sont également représentés les cours d'eau et les talus répartis tout le long de la route frontalière 1856 (Mende et Astorga, 2013).

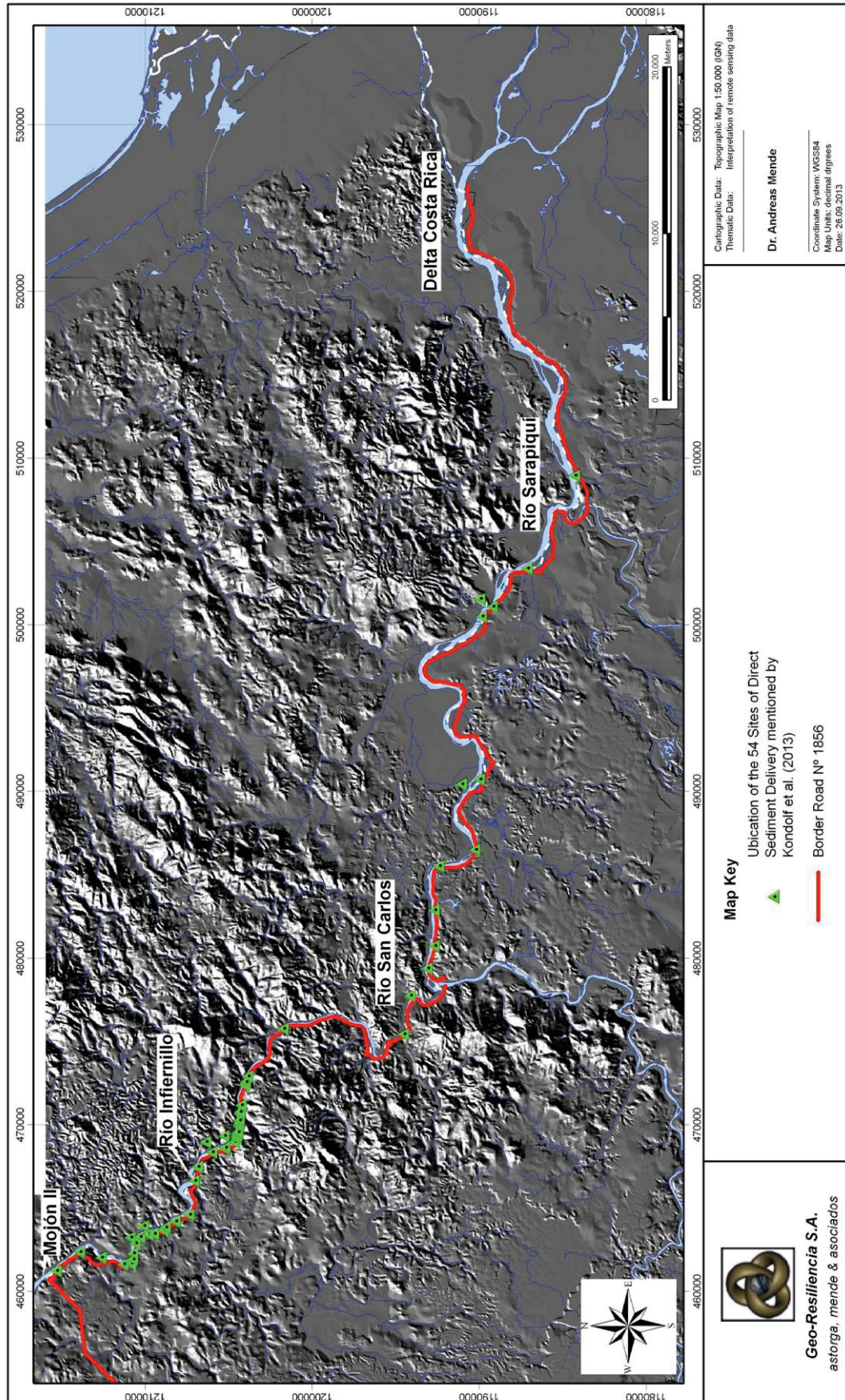
La seconde partie du présent rapport propose des fiches techniques fournissant des données complètes sur les caractéristiques locales de chacun des 54 sites évoqués dans le rapport Kondolf. Ces fiches comportent les informations suivantes :

1. Coordonnées GPS en degrés décimaux, telles que présentées à la Cour par le Gouvernement nicaraguayen en juillet 2013 (annexe I de la note HOL-CAG-146 du 29 juillet 2013).
2. Estimation de la production sédimentaire maximale de chaque site, établie sur la base de l'inventaire des pentes (Mende *et al.*, 2013).
3. Volumes de sédiments charriés par le fleuve San Juan au niveau de chaque site, établis à partir du modèle hydrologique du fleuve (Gomez-Delgado *et al.*, 2013).
4. Production sédimentaire maximale exprimée en pourcentage du volume sédimentaire total charrié par le San Juan.
5. Description concise des spécificités du site.
6. Renvoi à la nomenclature utilisée dans l'inventaire des pentes et cours d'eau de la route frontalière 1856 (Mende *et al.*, 2013).
7. Carte détaillée et localisée du site.
8. Photographies représentatives illustrant clairement la situation réelle du site.

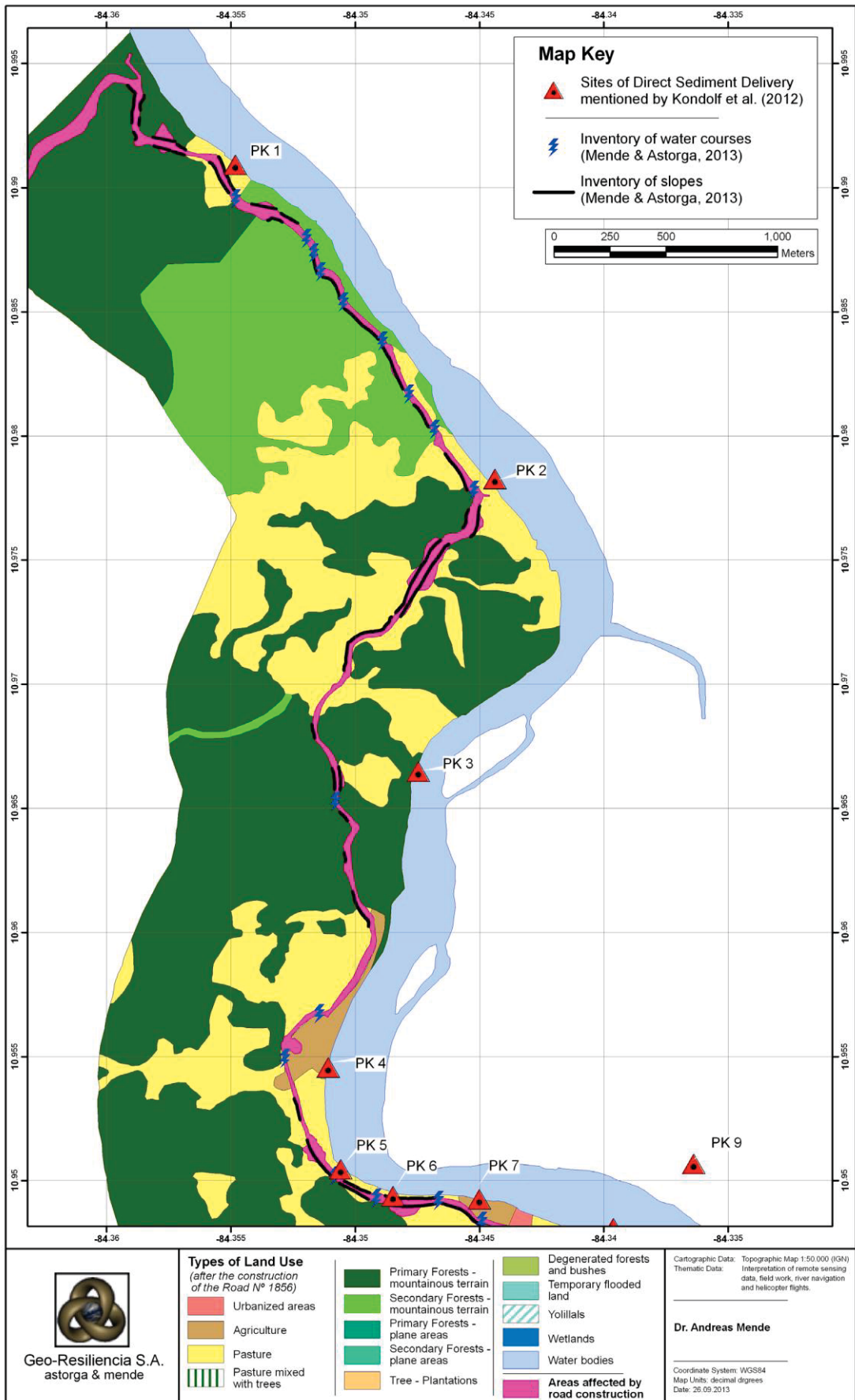
Pour finir, le présent rapport récapitule les résultats de l'étude et présente un certain nombre de conclusions quant à l'importance, pour le San Juan dans son ensemble, des 54 sites mentionnés dans le rapport Kondolf.



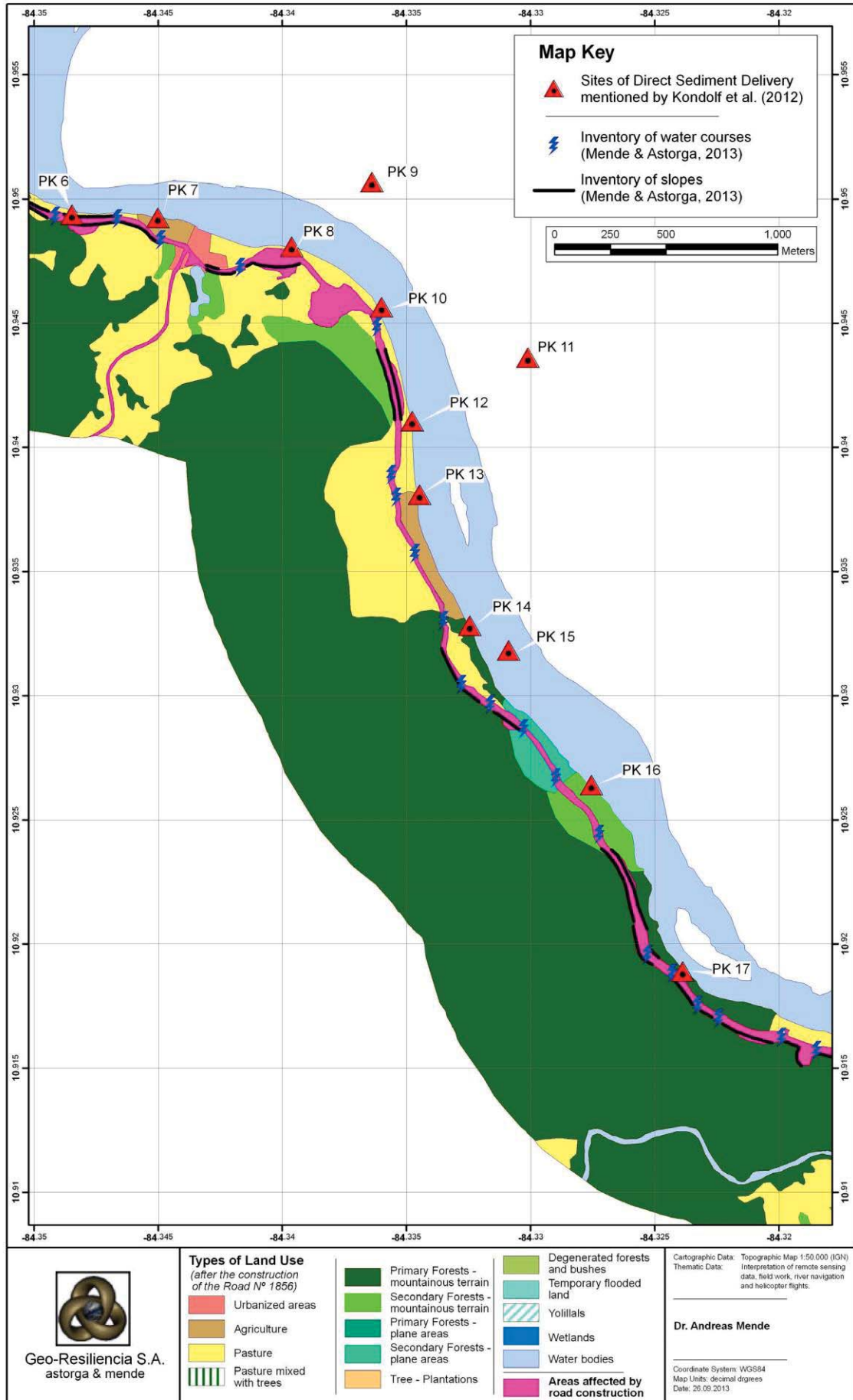
### Carte générale : répartition géographique des 54 sites évoqués dans le rapport Kondolf

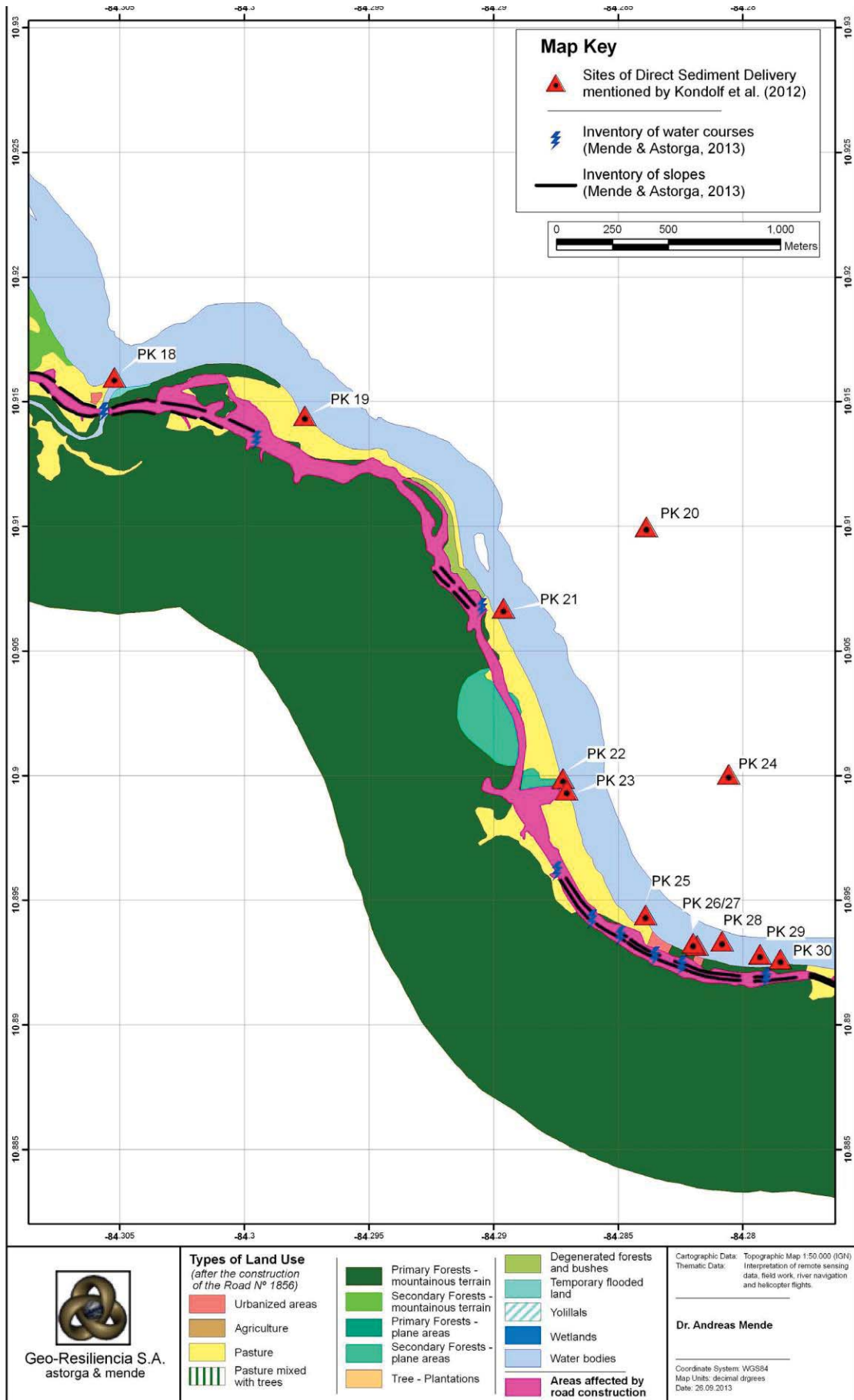


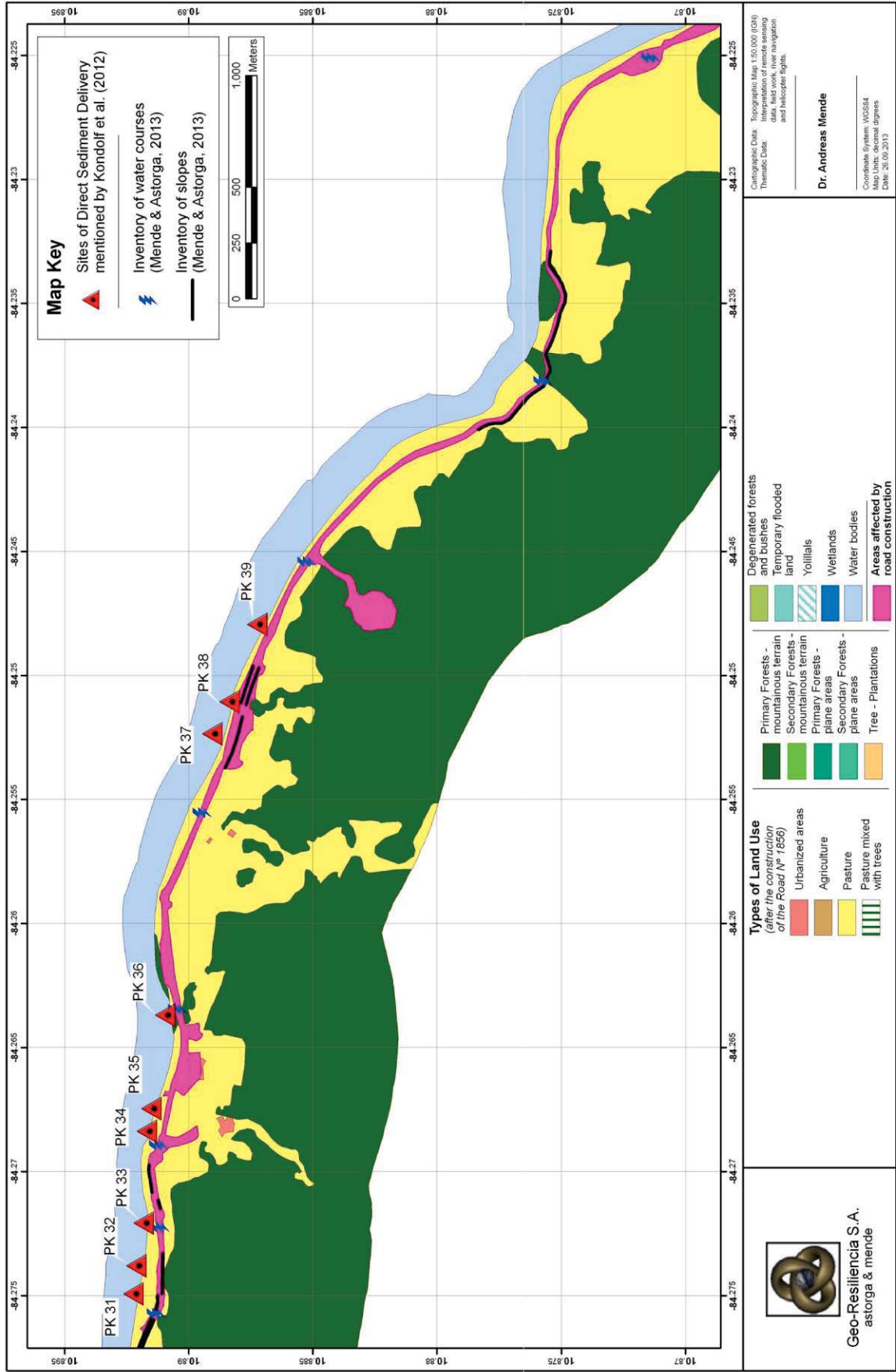
**Cartes détaillées – Utilisation des terres, pentes et cours d'eau le long de la route frontalière 1856, avec répartition géographique des 54 sites évoqués dans le rapport Kondolf**



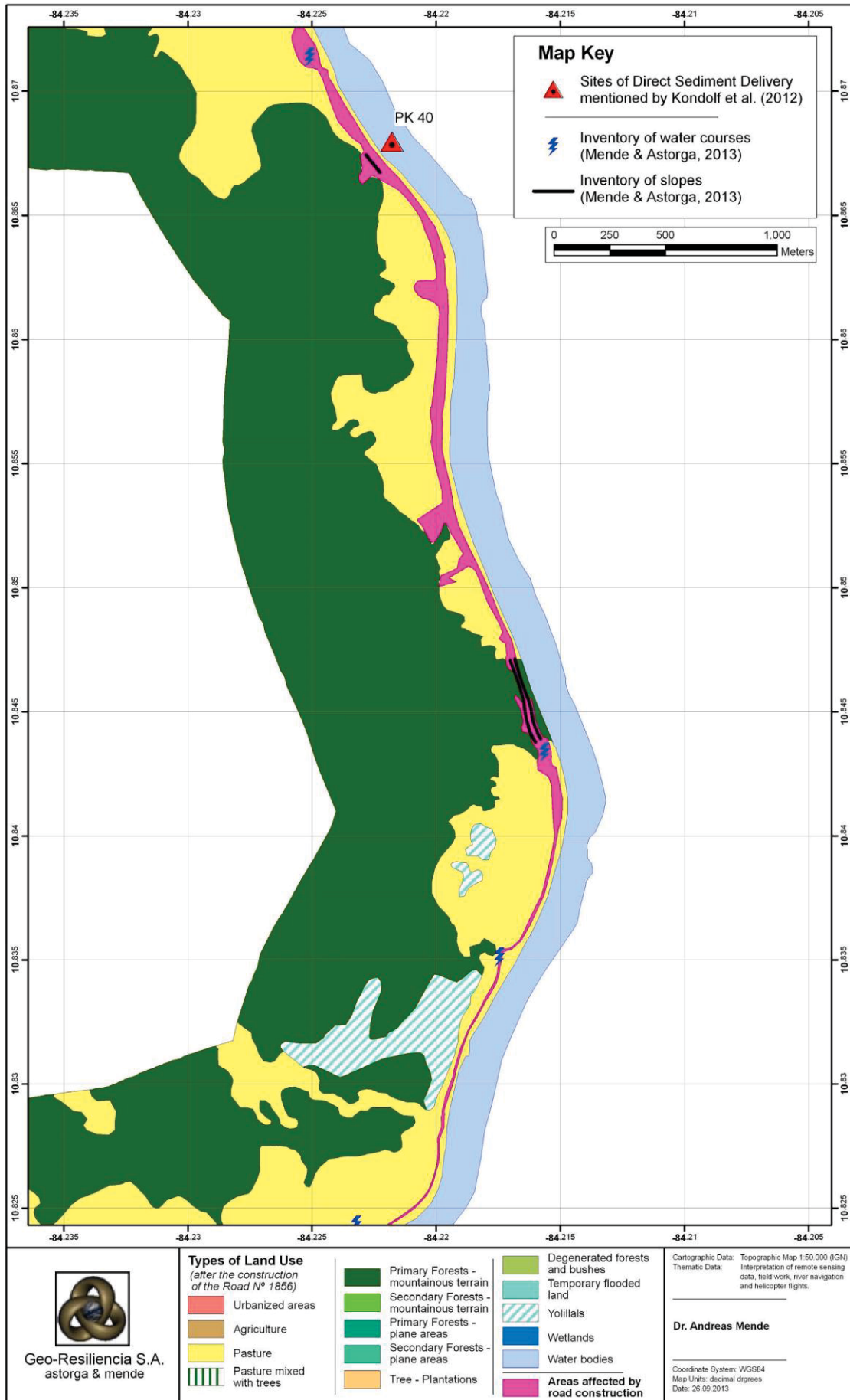




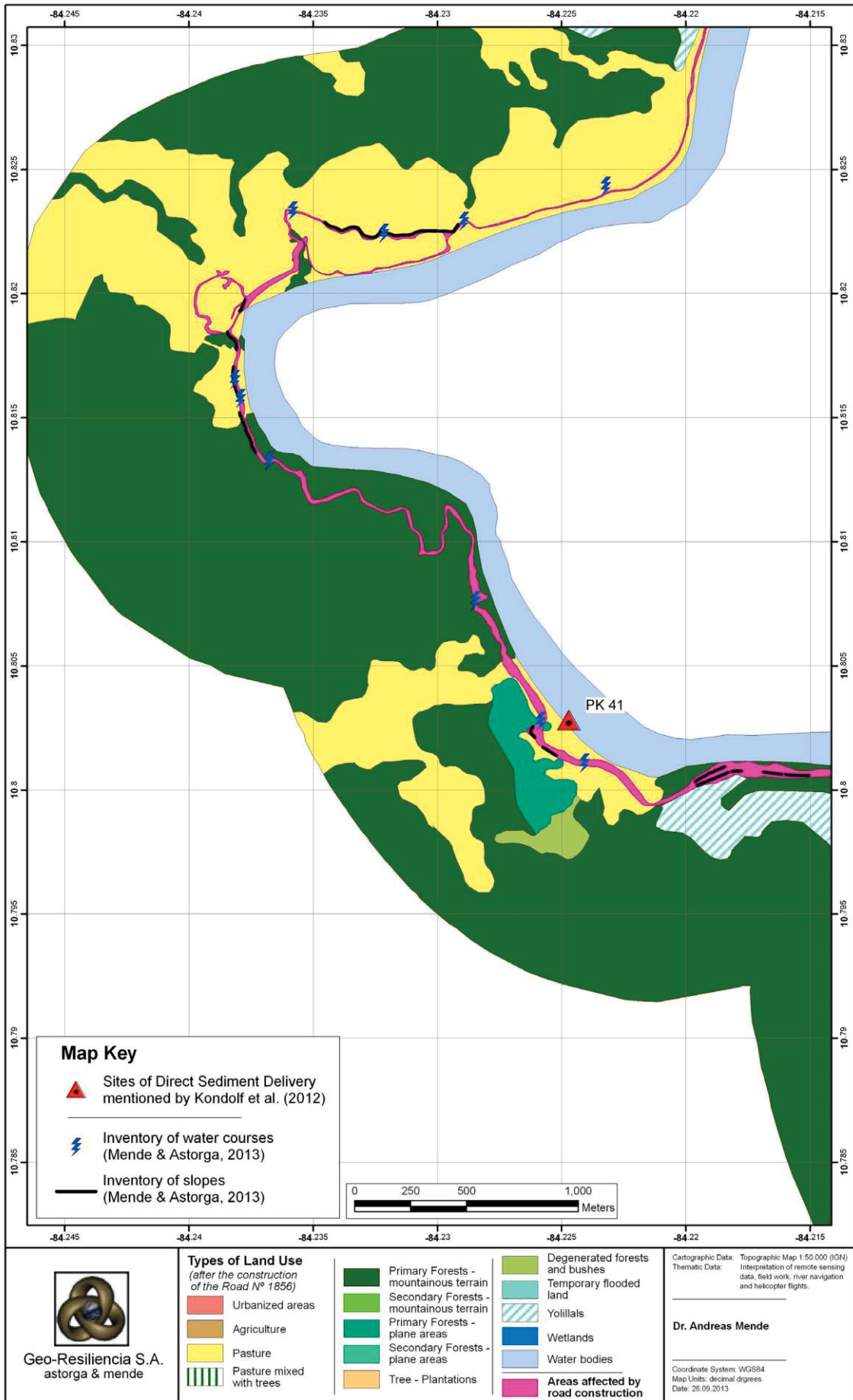


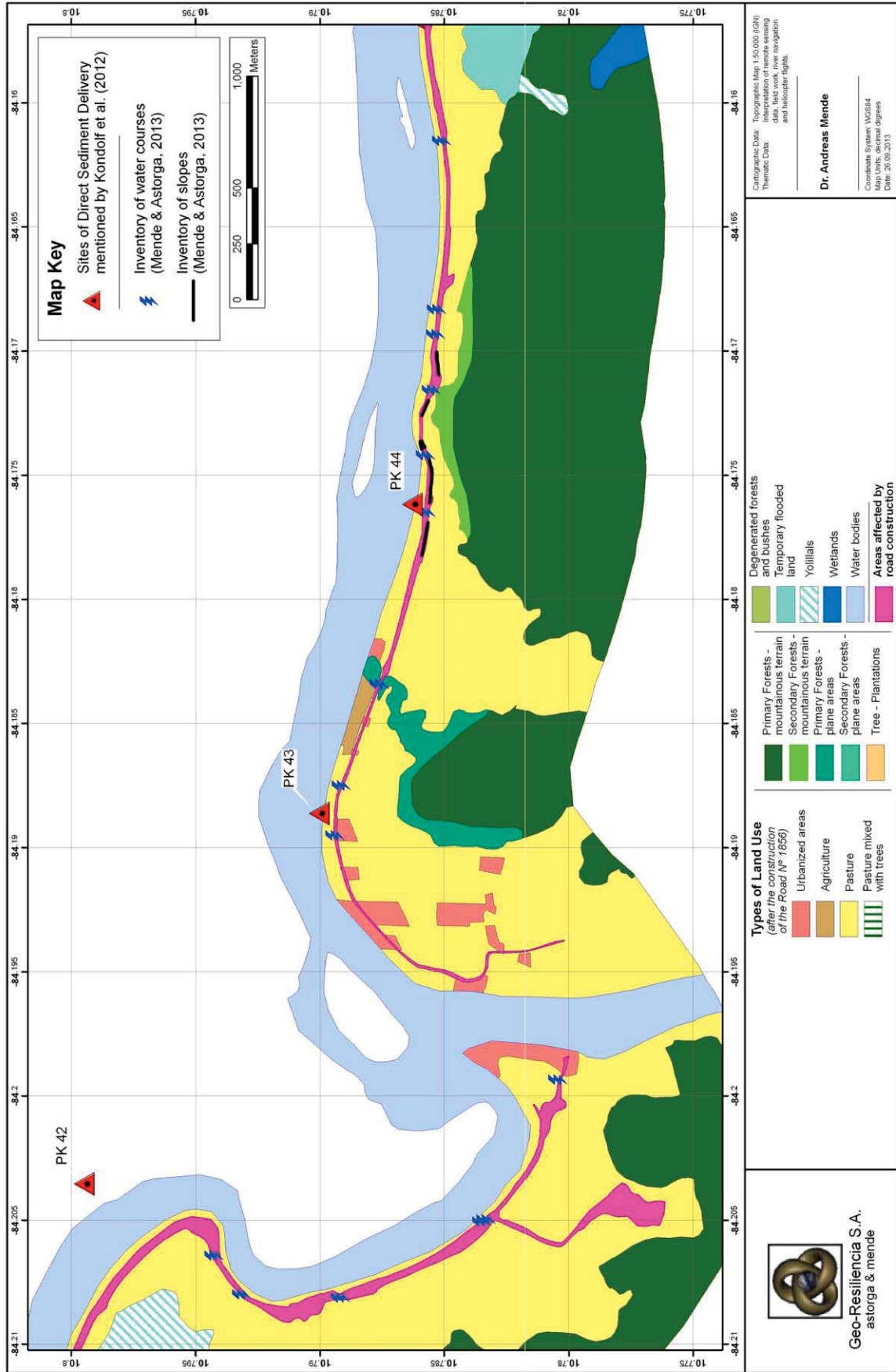


**Geo-Resiliencia S.A.**  
 astorga & mende

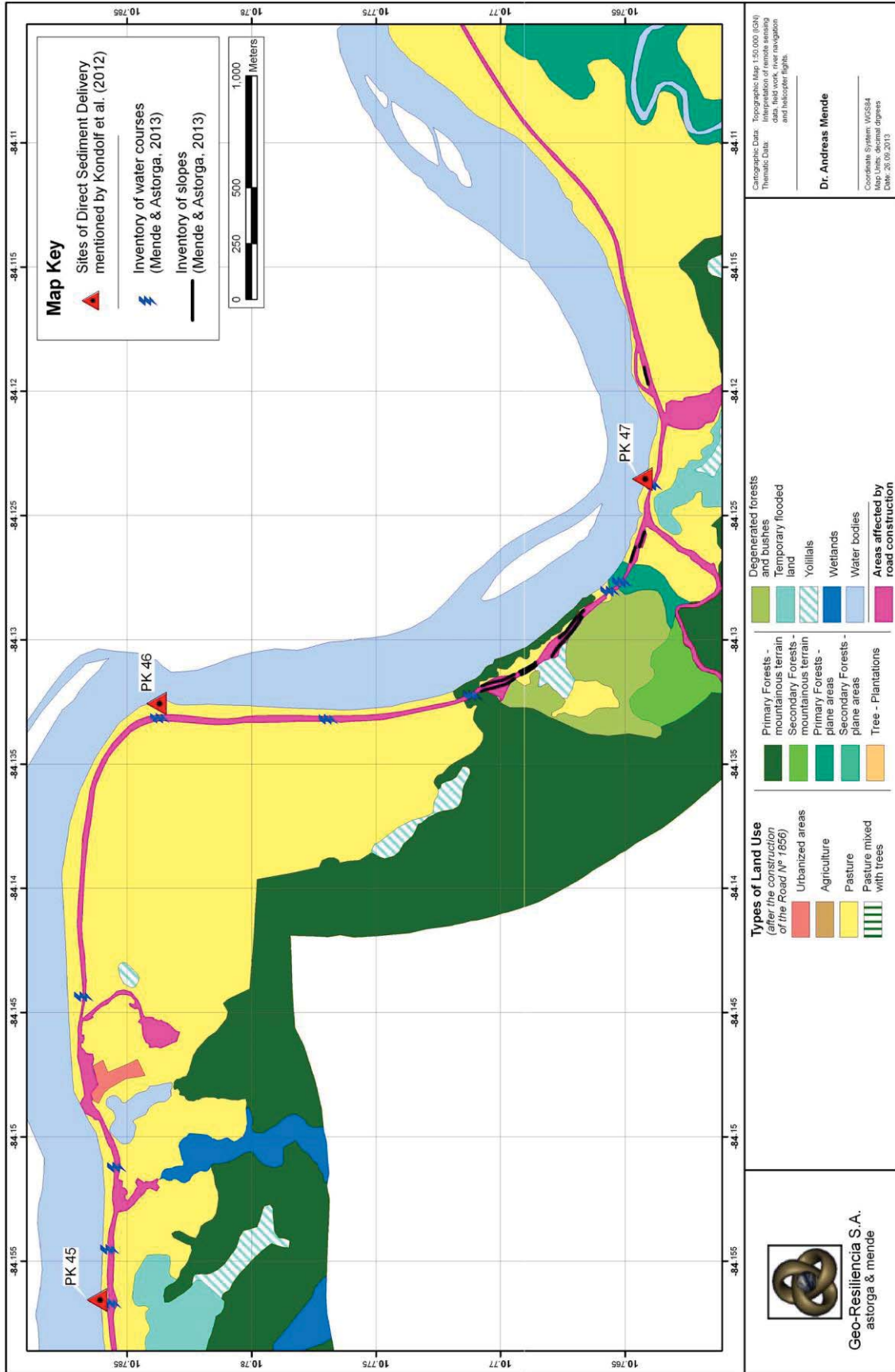


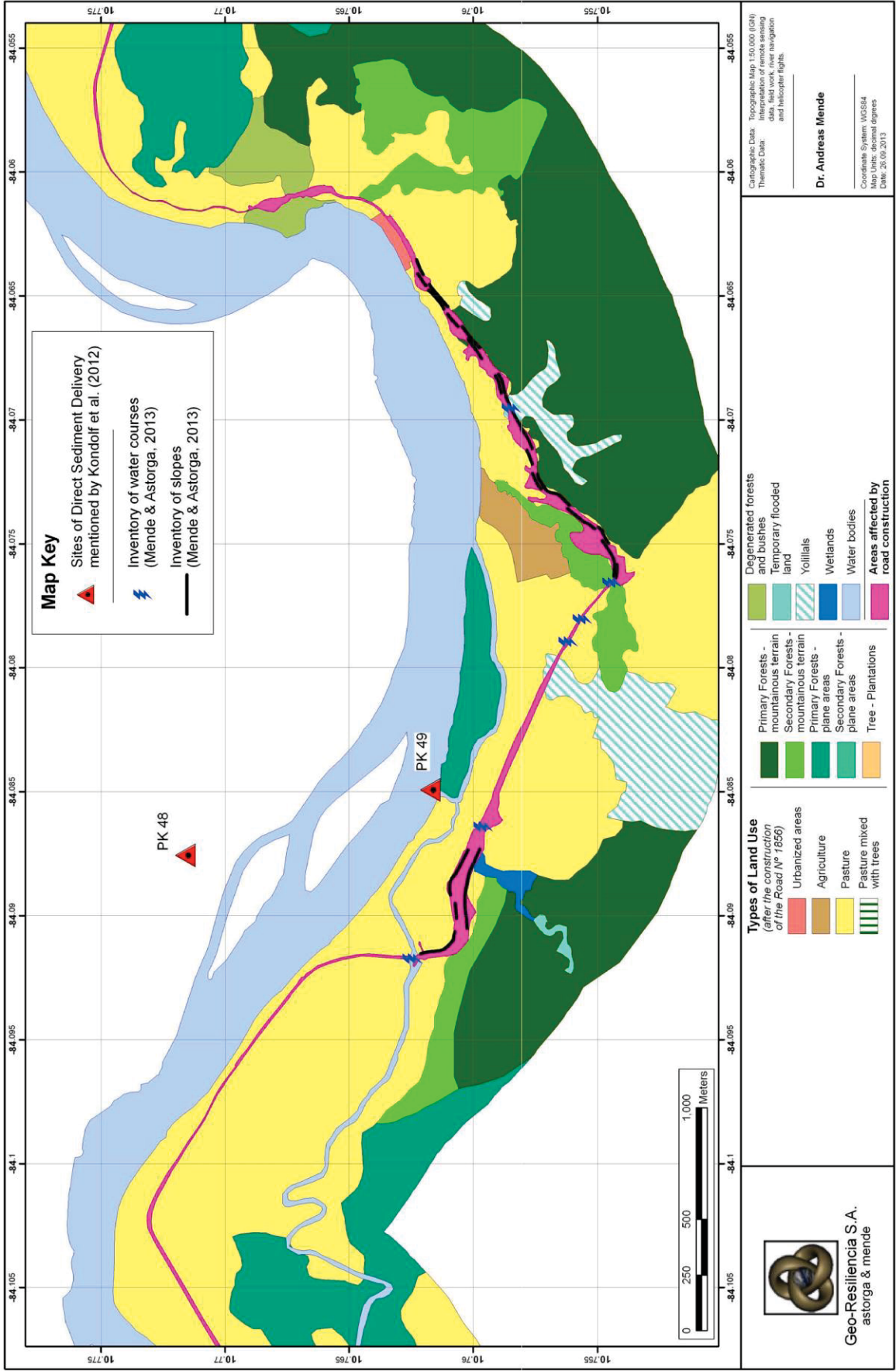


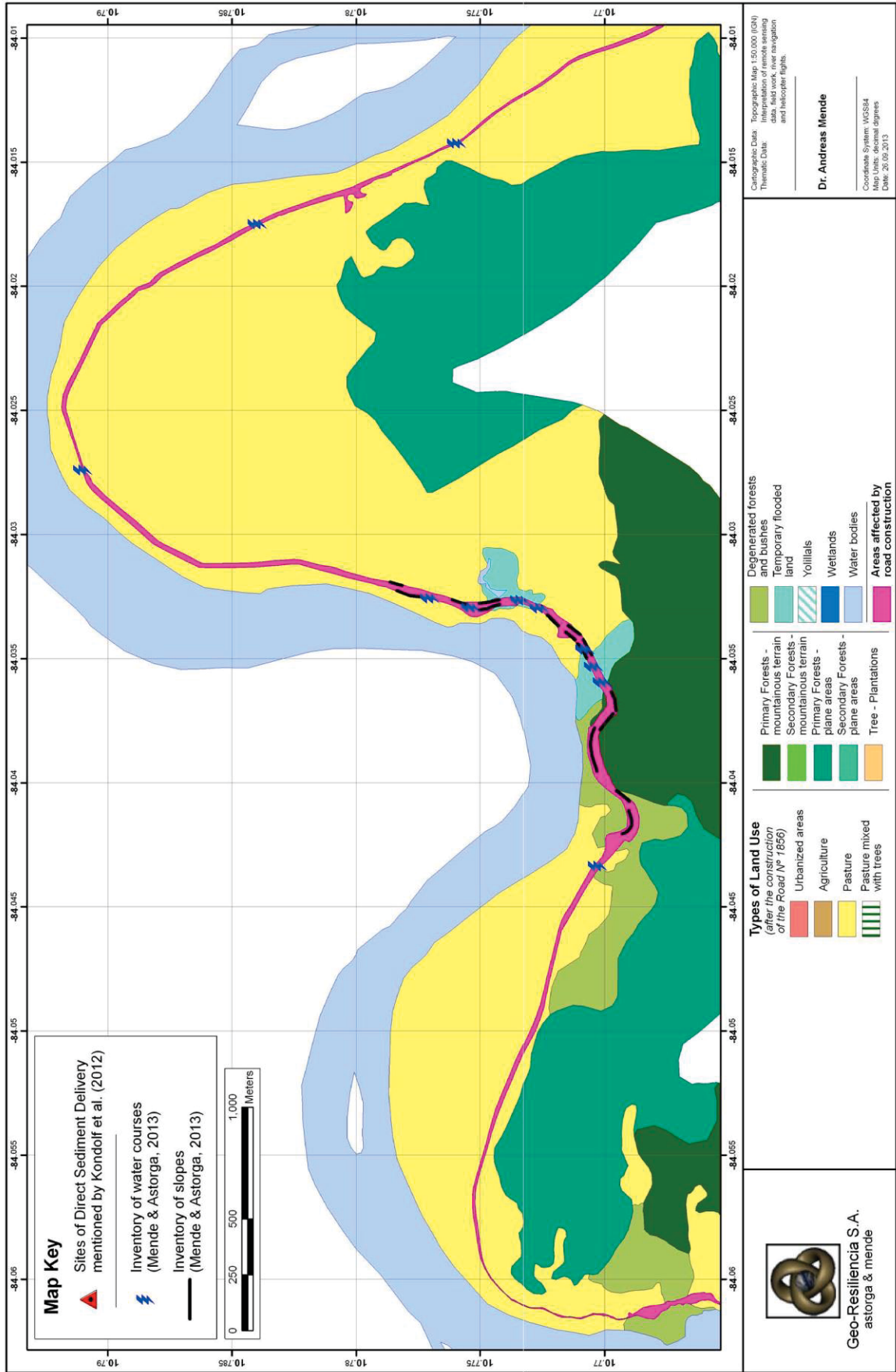












**Map Key**

- Sites of Direct Sediment Delivery mentioned by Kondolf et al. (2012)
- Inventory of water courses (Mende & Astorga, 2013)
- Inventory of slopes (Mende & Astorga, 2013)



**Types of Land Use (after the construction of the Road N° 1856)**

- Urbanized areas
- Agriculture
- Pasture
- Pasture mixed with trees

**Primary Forests - mountainous terrain**

- Primary Forests - mountainous terrain
- Primary Forests - plane areas
- Secondary Forests - mountainous terrain
- Secondary Forests - plane areas
- Tree - Plantations

**Degenerated forests and bushes**

- Degenerated forests and bushes
- Temporary flooded land
- Yollilals
- Wetlands
- Water bodies
- Areas affected by road construction

Cartographic Data: Topographic Map 1:50,000 (IGN)  
 Interpretation of remote sensing data, field work, river navigation and interpretation.

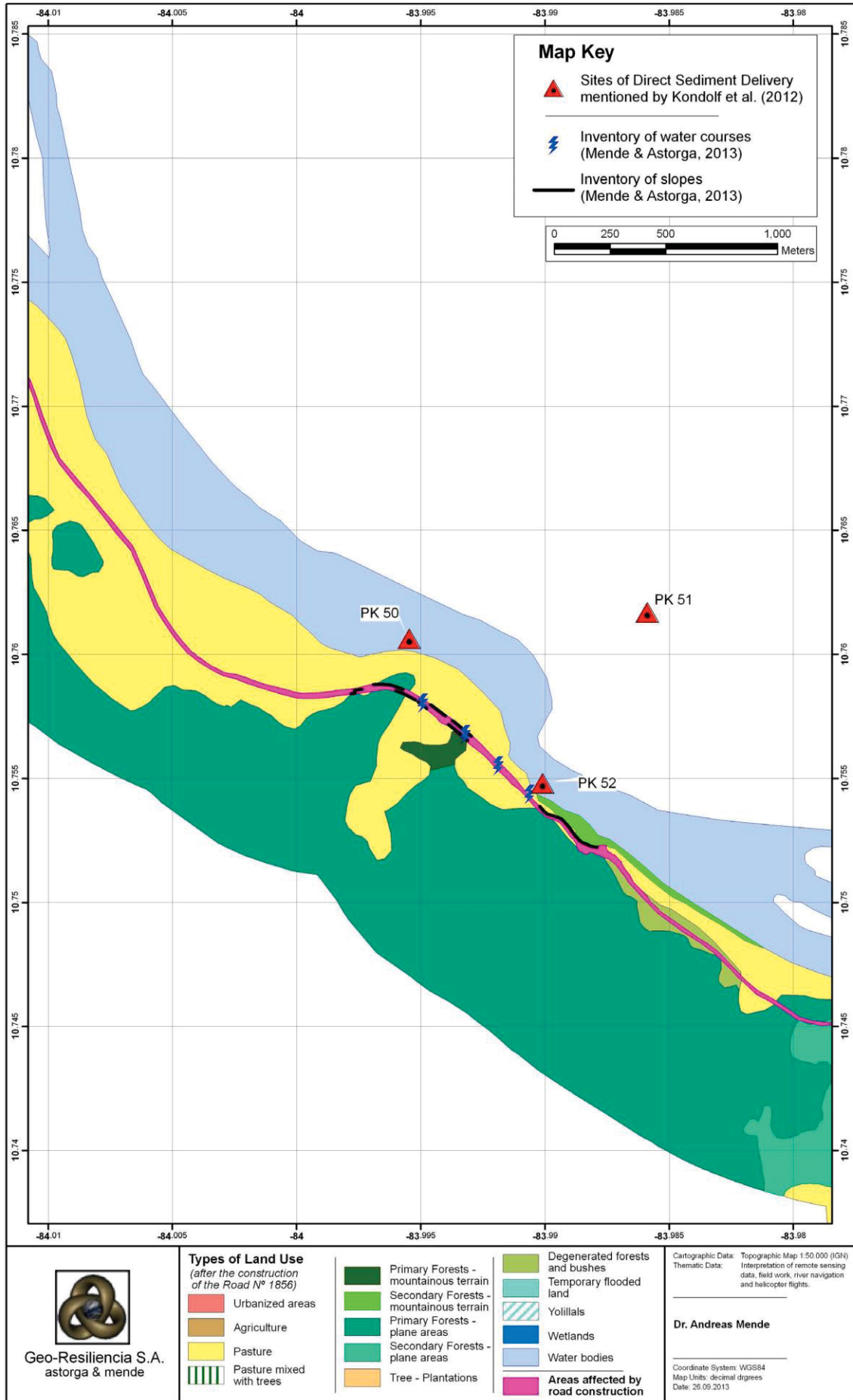
Thematic Data:

**Dr. Andreas Mende**

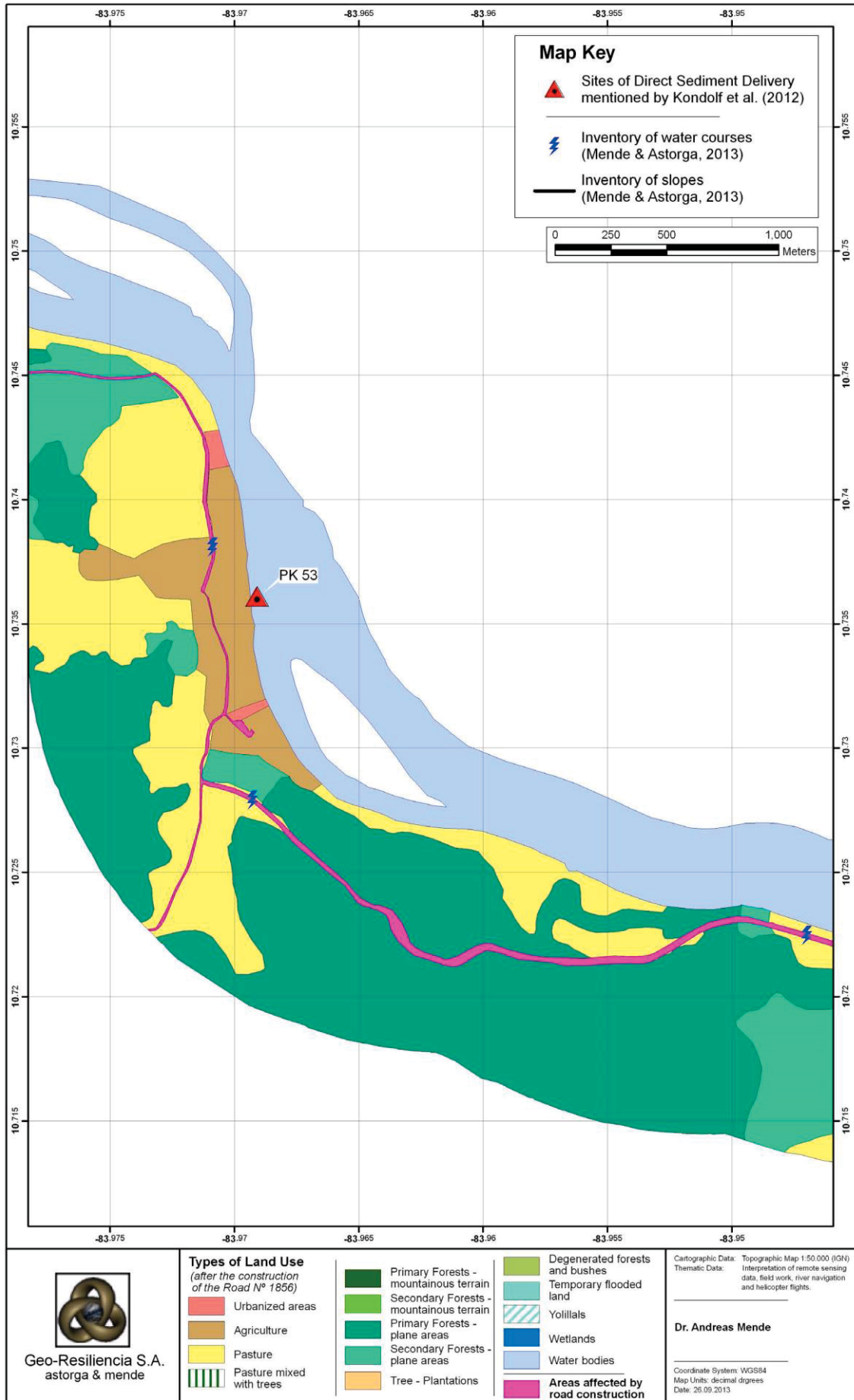
Coordinate System: WGS84  
 Map Units: decimal degrees  
 Date: 26.09.2013

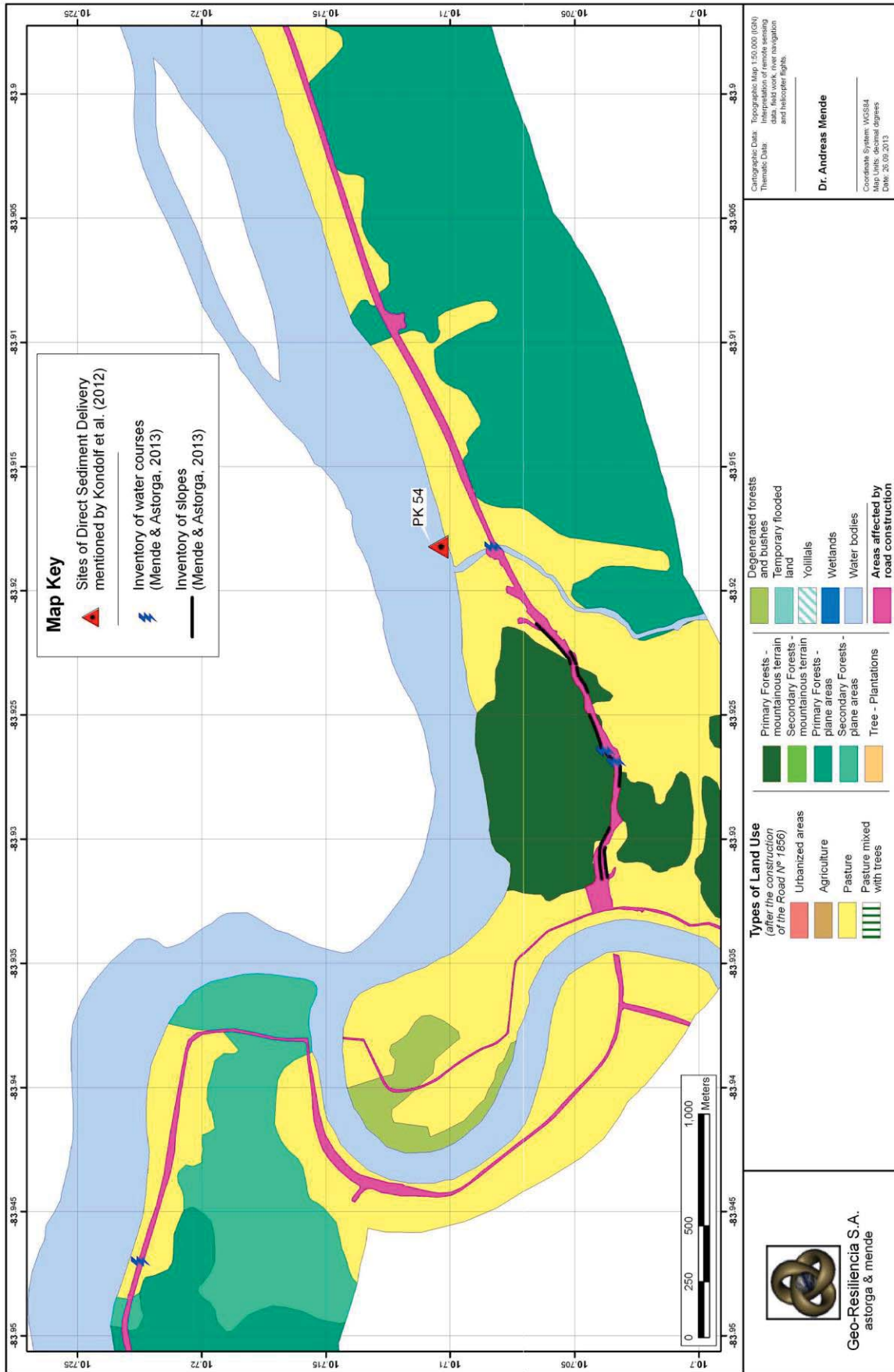


**Geo-Resiliencia S.A.**  
 astorga & mende











## Fiches techniques des 54 sites évoqués dans le rapport Kondolf

*Border Road N° 1856 – Evaluation of the 54 Sites of Purported Direct Sediment Delivery mentioned by Ph.D. Mathias Kondolf*

20

Point Kondolf PK1

Coordonnées x-y : -84,35485800 - 10,99093000

Production sédimentaire maximale (estimation) : 740 t/an

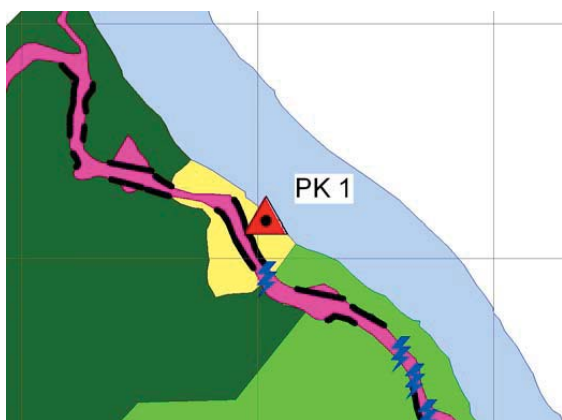
Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,022 %

Description :

Talus de remblai sans aucun dispositif d'évacuation ; l'écoulement des eaux le long de la route entraîne la formation de ravines.

Pente afférente : T-8 Cours d'eau afférent : néant



**Point Kondolf PK2**

Coordonnées x-y : -84,34441200 - 10,97827500

Production sédimentaire maximale (estimation) : 360 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

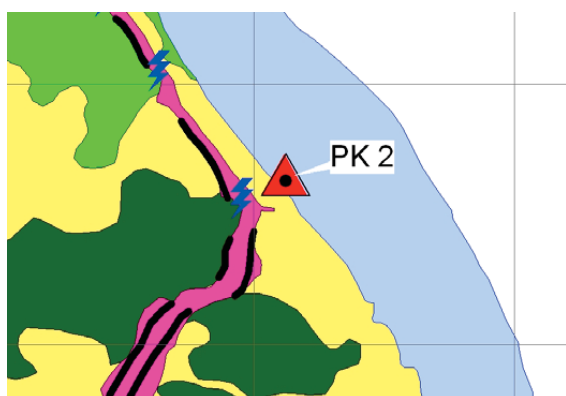
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,011 %

**Description :**

Des matériaux et déchets ont été déposés dans un cours d'eau (référéncé C-8) et l'infiltration des eaux ainsi bloquées a entraîné l'affaissement de la structure de la route. Si ces écoulements sont susceptibles d'atteindre la route lors des épisodes d'averses, les quantités de sédiments transportées jusqu'au San Juan demeurent très faibles.

Pente afférente : T-17

Cours d'eau afférent : C-8





Point Kondolf PK3

Coordonnées x-y : -84,34750000 - 10,966488

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

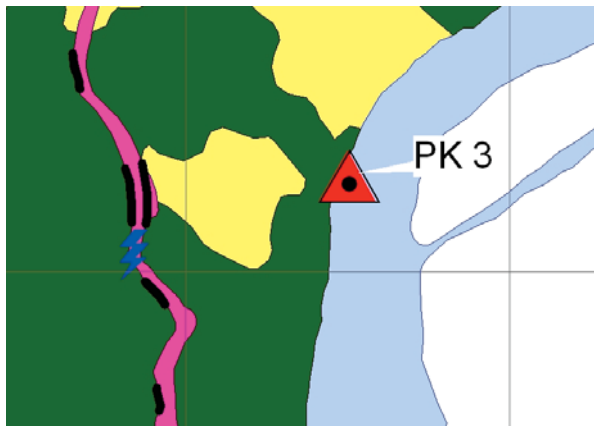
Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Ce site est probablement lié à la pente T-24 et/ou au cours d'eau C-10, mais rien n'indique que des sédiments provenant de ces formations puissent atteindre le San Juan, distant de 350 mètres.

Pente afférente : T-24 ( ? ) Cours d'eau afférent : C-10 ( ? )



Point Kondolf PK4

Coordonnées x-y : -84,351123 - 10,954566

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

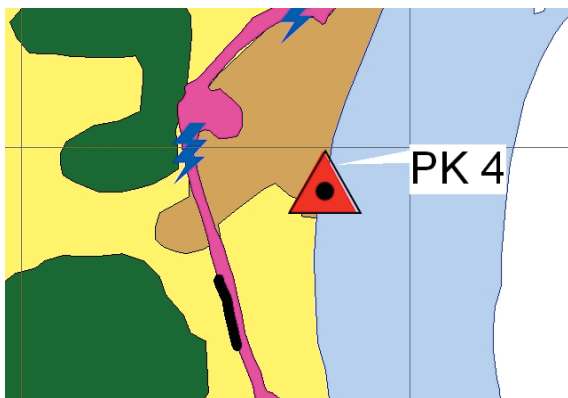
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Malgré la présence d'un pont cassé entraînant des dépôts sédimentaires limités, le panache de sédiments présent dans le San Juan est généré, pour l'essentiel, par l'érosion des sols dans la partie supérieure de son bassin hydrographique. En témoigne la photographie aérienne, qui montre clairement que le fleuve présente déjà une charge sédimentaire importante en amont du pont et de la zone de sol en friche liée à la construction de la route.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-12





Point Kondolf PK5

Point Kondolf PK5

Coordonnées x-y : -84,350615 - 10,950459

Production sédimentaire maximale (estimation) : 260 t/an

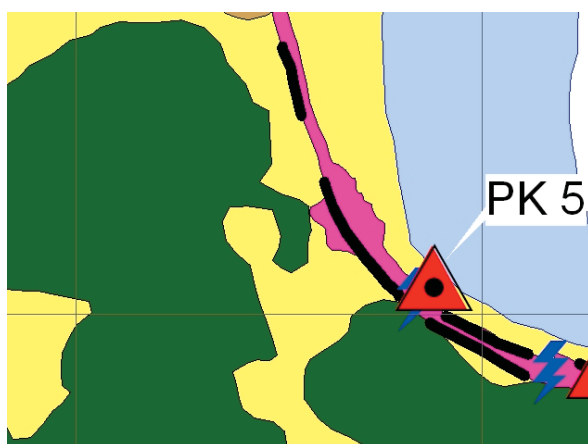
Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,008 %

Description :

Présence d'une rigole ; il est possible qu'une partie des sédiments résultant de l'érosion des pentes situées à proximité soit transportée dans le San Juan. Des mesures d'atténuation ont été mises en œuvre sur ce site.

Pentes afférentes : T-29, T-30, T-31 Cours d'eau afférent : C-13



Point Kondolf PK6

Coordonnées x-y : -84,348509 - 10,949374

Production sédimentaire maximale (estimation) : 1200 t/an

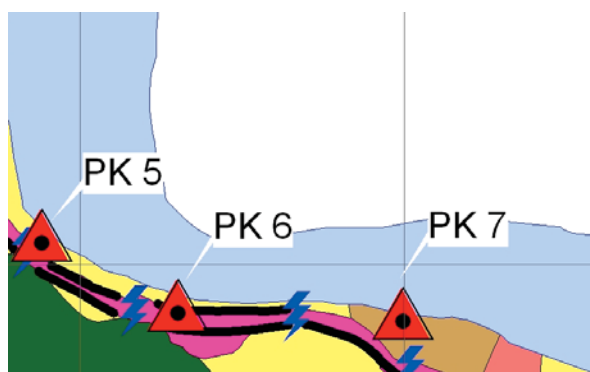
Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,035 %

Description :

Présence d'une rigole ; il est possible qu'une partie des sédiments résultant de l'érosion des pentes situées à proximité soit transportée dans le San Juan. Des mesures d'atténuation ont été mises en œuvre sur ce site.

Pentes afférentes : T-30, T-31, T-32a, T-32b Cours d'eau afférent : C-14





Point Kondolf PK7

Coordonnées x-y : -84,345042 - 10,949253

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

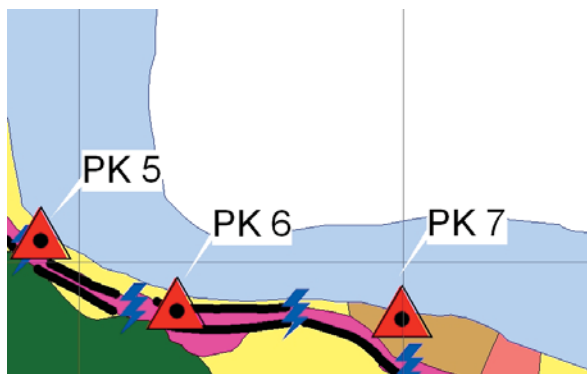
Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Présence d'un pont provisoire sur un petit cours d'eau, avec de légers signes d'érosion en aval du pont.

Pente afférente : néant Cours d'eau afférent : C-16



**Point Kondolf PK8**

Coordonnées x-y : -84,339647 - 10,948089

Production sédimentaire maximale (estimation) : 340 t/an

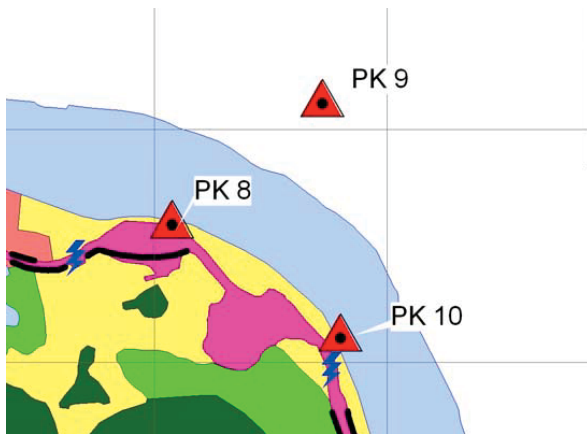
Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,010 %

Description :

Pente T-37 ; des mesures d'atténuation ont été mises en œuvre .

Pente afférente : T-37 Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK9

Coordonnées x-y : -84,336418 - 10,950686

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

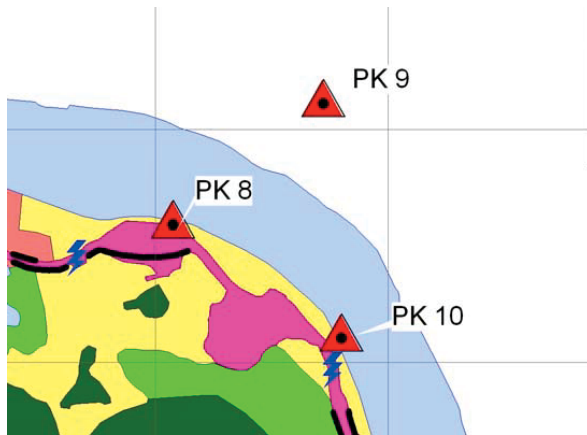
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site faisant partie du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK10

Coordonnées x-y : -84,336028 - 10,945655

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

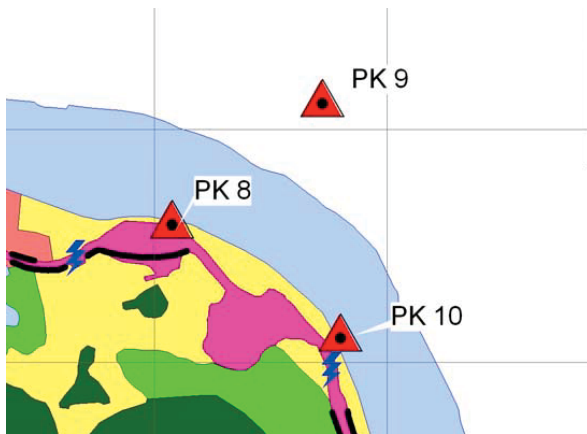
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Présence d'un ponceau, légères traces d'érosion.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-18



Point Kondolf PK11

Coordonnées x-y : -84,330133 - 10,943617

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

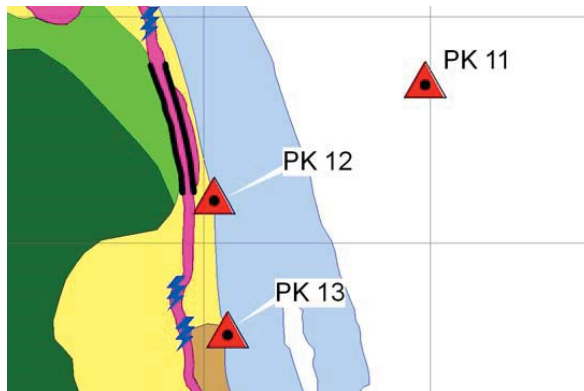
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site faisant partie du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK12

Coordonnées x-y : -84,334792 - 10,941062

Production sédimentaire maximale (estimation) : 4000 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

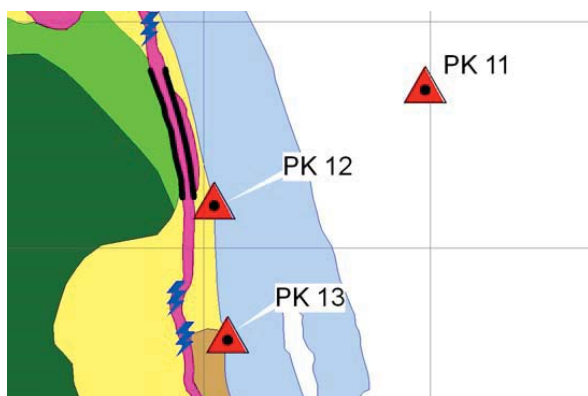
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,119 %

Description :

Pente T-38 ; de nouvelles mesures d'atténuation doivent être mises en œuvre sur ce site.

Pente afférente : T-8

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK13

Coordonnées x-y : -84,3345 - 10,938104

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

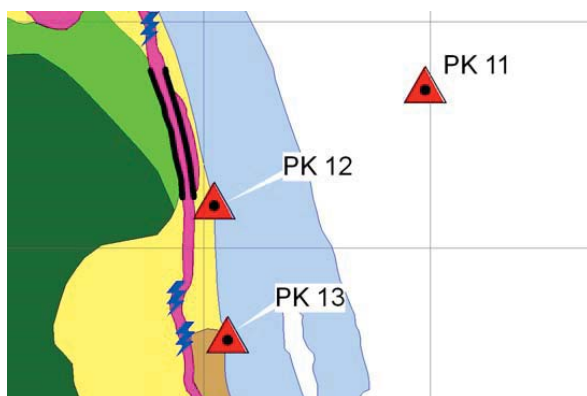
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Conduit d'écoulement provisoire en état satisfaisant ; aucun signe d'érosion ou de sédimentation dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-20



Point Kondolf PK14

Coordonnées x-y : -84,332474 - 10,932826

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

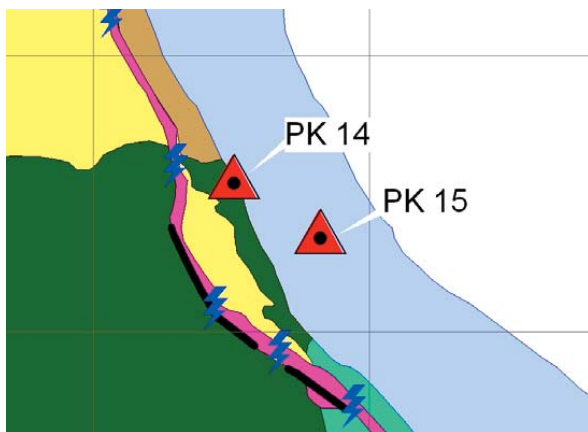
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Pont provisoire en état satisfaisant ; aucun signe d'érosion ou de sédimentation dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-22





Point Kondolf PK15

Coordonnées x-y : -84,330911 - 10,931832

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

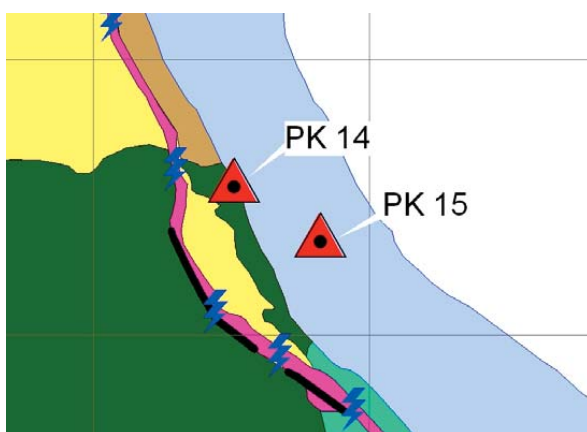
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Des matériaux et déchets ont été déversés dans ce cours d'eau, dont les eaux ainsi bloquées s'écoulent à travers lesdits matériaux, sans qu'aucun dommage important n'ait été constaté à ce jour. Un certain volume de sédiments est transporté en direction du San Juan mais ne l'atteint pas, en raison de la présence d'une plaine agissant comme une zone tampon entre la route et le fleuve.

Pente afférente :

Cours d'eau afférent : C-23



Point Kondolf PK16

Coordonnées x-y : -84,327579 - 10,926409

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

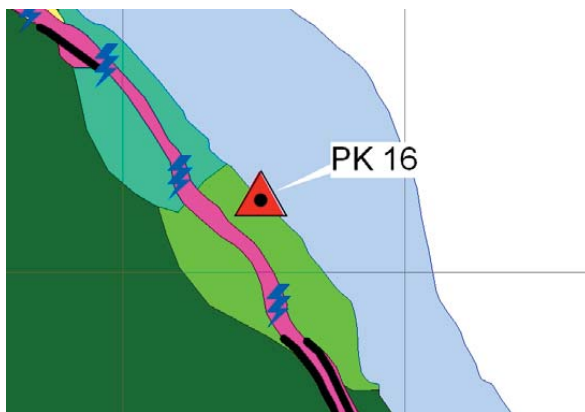
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Bien que ce site ne soit pas directement associé à une pente ou à un cours d'eau, un lien peut être établi avec le cours d'eau C-26, que la route traverse au moyen d'un pont provisoire sans causer d'érosion ni de sédimentation dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-26 ( ?)





Point Kondolf PK17

Coordonnées x-y : -84,323897 - 10,918903

Production sédimentaire maximale (estimation) : 300 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 362 000 t/an

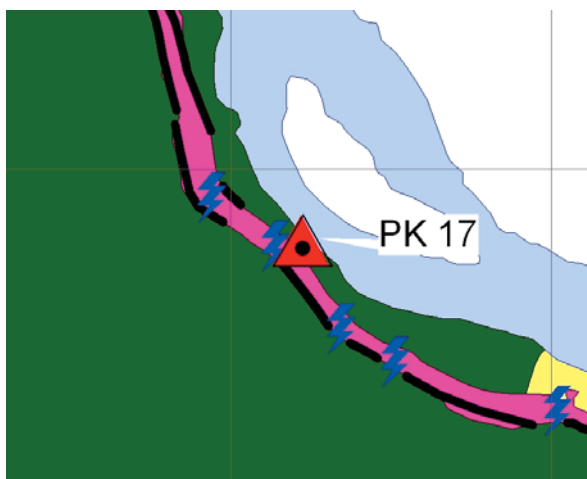
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,009 %

Description :

Voie d'écoulement collectant les sédiments issus de la pente T-46 ; signes de ravinement. Des travaux d'atténuation ont été mis en œuvre sur ce site.

Pente afférente : T-46

Cours d'eau afférent : C-29



**Point Kondolf PK18**

Coordonnées x-y : -84,305245 - 10,915977

Production sédimentaire maximale (estimation) : 5580 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

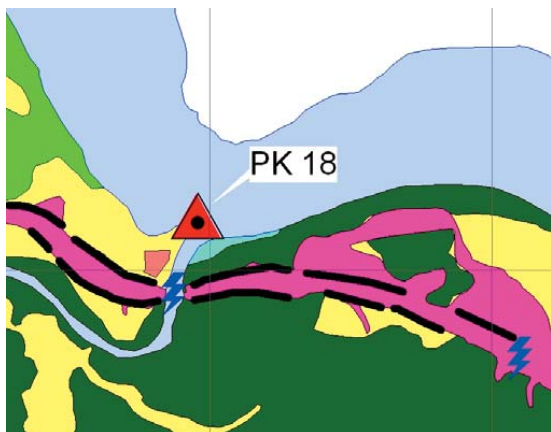
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,157 %

Description :

Zone où coule l'Infiernito, à proximité de sept pentes ; toutefois, ainsi que le montre clairement la photographie, le panache de sédiments présent dans le San Juan est essentiellement dû à l'érosion de la partie supérieure de son bassin hydrographique.

Pentes afférentes : T-56, T-57a, T-57b, T-58a, T-58b, T-59, T-60

Cours d'eau afférent : C-35





Point Kondolf PK19

Coordonnées x-y : -84,297602 - 10,914443

Production sédimentaire maximale (estimation) : 2160 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

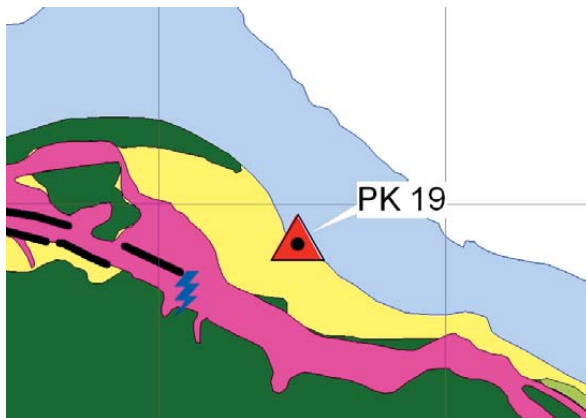
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,061 %

Description :

Large zone de sol en friche présentant une forte déclivité ; des travaux d'atténuation ont été mis en œuvre sur ce site.

Pente afférente : T-61

Cours d'eau afférent : C-36



Point Kondolf PK20

Coordonnées x-y : -84,283903 - 10,909981

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

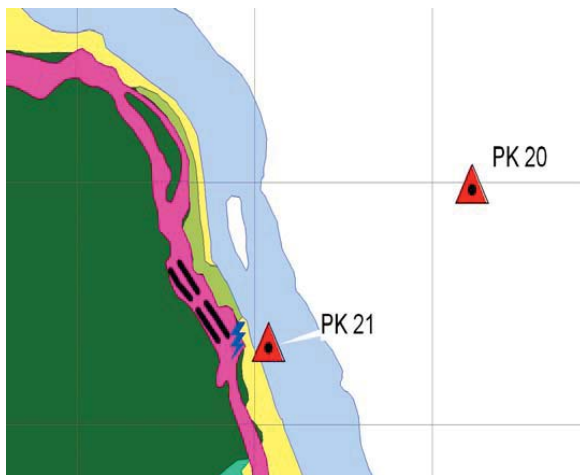
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site relevant du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK21

Coordonnées x-y : -84,289629 - 10,90672

Production sédimentaire maximale (estimation) : 2070 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

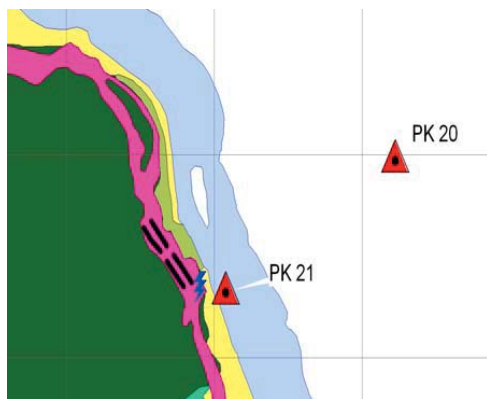
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,058 %

Description :

Site révélant d'importants phénomènes de ravinement et de glissement de terrain.

Pente afférente : T-65

Cours d'eau afférent : C-37





Point Kondolf PK22 et PK23

Coordonnées x-y (PK22) : -84,28725 - 10,899889

Coordonnées x-y (PK23) : -84,287094 10,899421

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

En raison de conditions météorologiques particulièrement difficiles lors des opérations sur le terrain, il n'a pas été possible, à ce jour, de recueillir des données pour les points PK22 et PK23. Les images satellite ne permettent pas d'établir la présence de dépôts sédimentaires dans le San Juan à hauteur de ce site. Les points PK22 et PK23 étant très proches l'un de l'autre, ils peuvent être considérés comme formant un seul et même site.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK24

Coordonnées x-y : -84,280593 - 10,90006

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

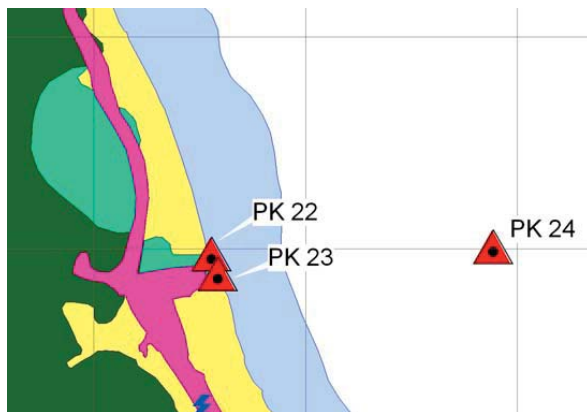
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site faisant partie du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK25

Coordonnées x-y : -84,283927 - 10,89442

Production sédimentaire maximale (estimation) : 2250 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

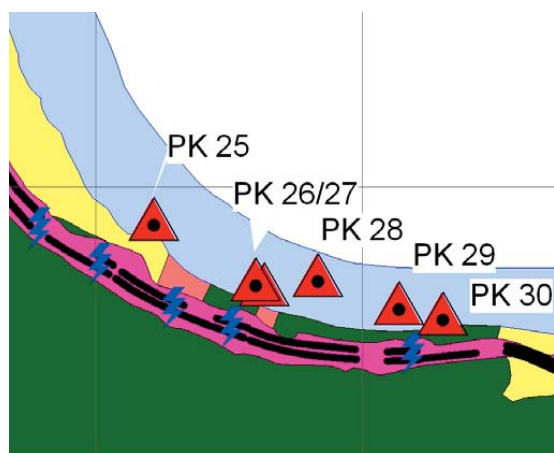
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,063 %

Description :

Talus de remblai montrant ravine et glissements de terrain.

Pente afférente : T-68

Cours d'eau afférent : C-40



Point Kondolf PK26 et PK27

Coordonnées x-y (PK26) : -84,281868 - 10,893188

Coordonnées x-y (PK 27) : -84,282023 - 10,893287

Production sédimentaire maximale (estimation) : 4500 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

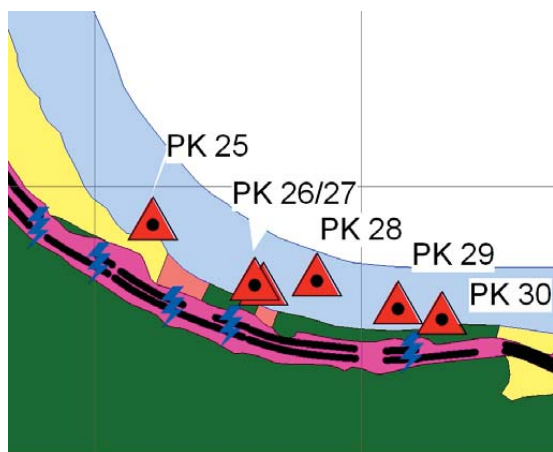
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,126 %

Description :

Les points PK26 et PK27 renvoient probablement au même site, caractérisé par un talus de remblai montrant des phénomènes de ravinement et de glissement de terrain.

Pente afférente : T-72

Cours d'eau afférent : C-42





Point Kondolf PK28

Coordonnées x-y : -84,280862 - 10,89337

Production sédimentaire maximale (estimation) : 3400 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

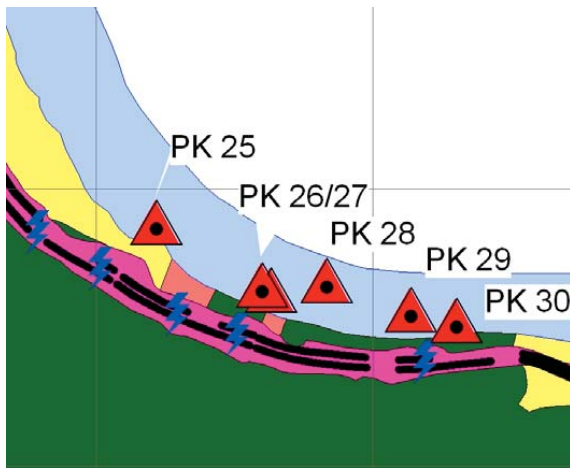
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,095 %

Description :

Site lié à la pente T-73 (talus de déblai), montrant d'importants phénomènes de ravinement et de glissement de terrain.

Pente afférente : T-73

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK29

Coordonnées x-y : -84,279346 - 10,892837

Production sédimentaire maximale (estimation) : 5000 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

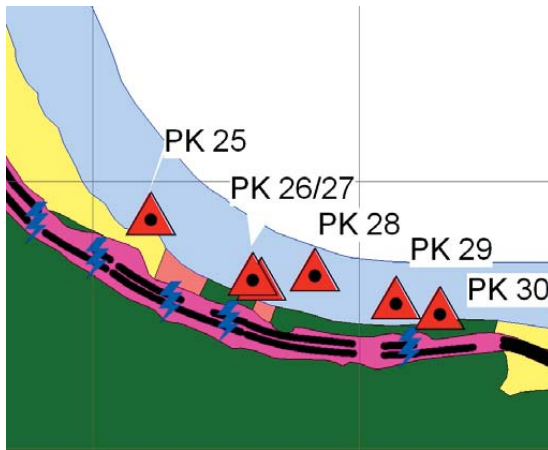
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,141 %

Description :

Site lié au à la pente T-74 (talus de remblai) qui jouxte une petite vallée arrosée par un cours d'eau (C-43).

Pente afférente : T-74

Cours d'eau afférent : C-43



**Point Kondolf PK30**

Coordonnées x-y : -84,278523 - 10,892642

Production sédimentaire maximale (estimation) : &lt; 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

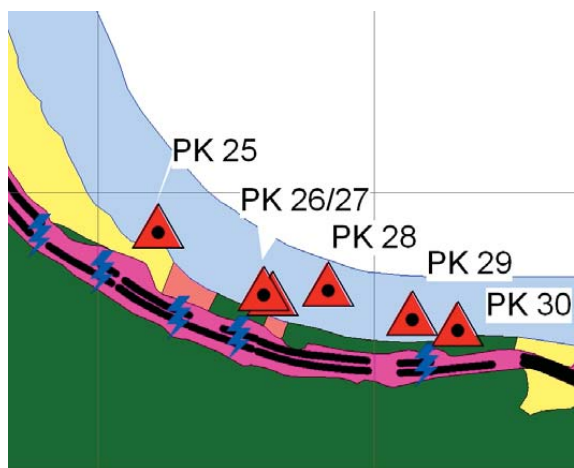
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site lié à la pente T-75 (talus de déblai) ; il n'existe actuellement aucun signe visible de transport sédimentaire en direction du San Juan.

Pente afférente : T-75

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK31

Coordonnées x-y : -84,274959 - 10,89224

Production sédimentaire maximale (estimation) : 50 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

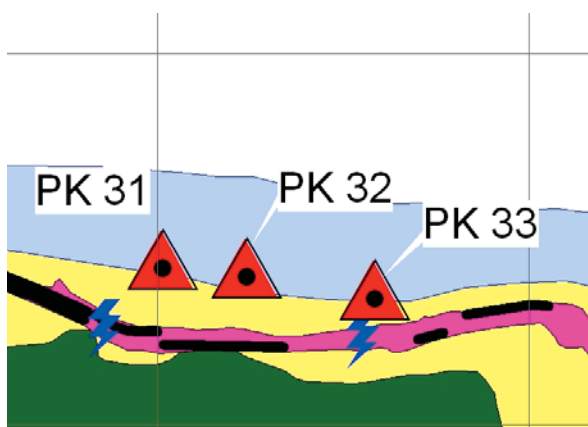
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,001 %

Description :

Site lié à la pente T-77 (talus de remblai) et au cours d'eau C-44b ; transport sédimentaire limité en direction du San Juan.

Pente afférente : T-77

Cours d'eau afférent : C-44b



Point Kondolf PK32

Coordonnées x-y : -84,273831 - 10,892122

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

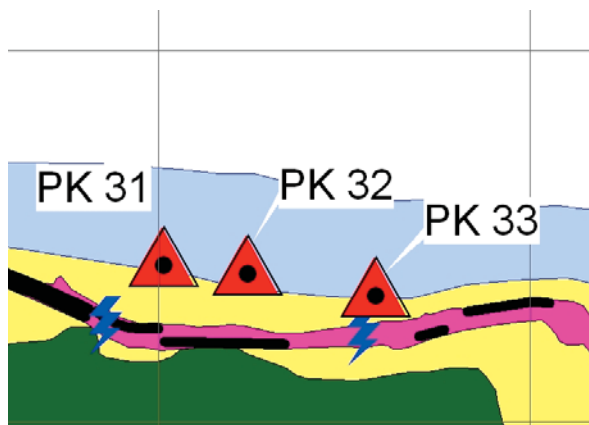
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site lié à la pente T-78 (talus de déblai) ; aucun signe de transport sédimentaire en direction du San Juan.

Pente afférente : T-78

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK33

Coordonnées x-y : -84,272108 - 10,891831

Production sédimentaire maximale (estimation) : 90 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

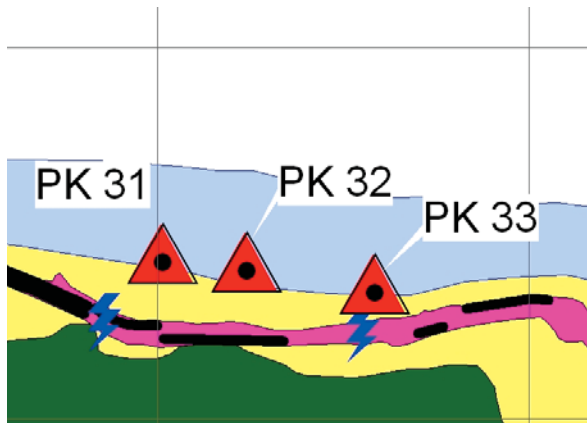
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,002 %

Description :

Site lié au cours d'eau C-44 et aux pentes T-79 et T-80 ; transport sédimentaire limité.

Pentes afférentes : T-79, T-80

Cours d'eau afférent : C-44





Point Kondolf PK34

Coordonnées x-y : -84,268405 - 10,891704

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

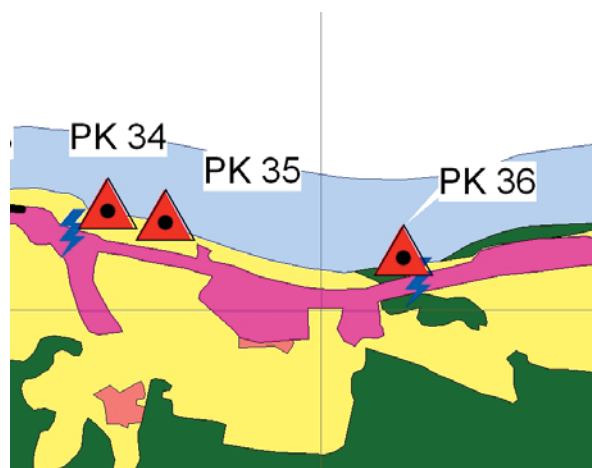
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Petit cours d'eau (C-45) sans aucun pont ; aucun signe de transport sédimentaire en direction du San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-45



Point Kondolf PK35

Coordonnées x-y : -84,267486 - 10,891516

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

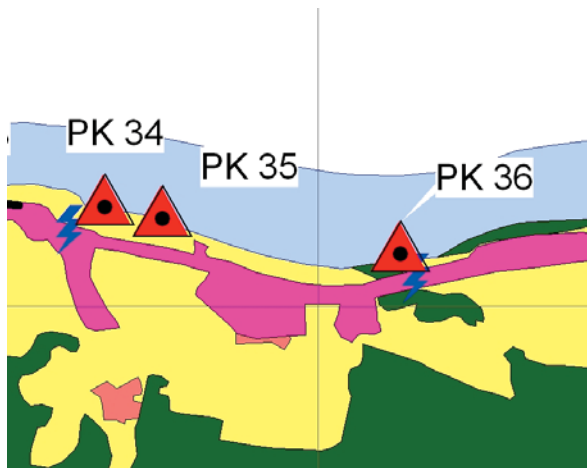
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Aucune source sédimentaire visible sur ce site.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK36

Coordonnées x-y : -84,263719 10,890958

Production sédimentaire maximale (estimation) : source érosive, mais aucune estimation à ce stade.

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

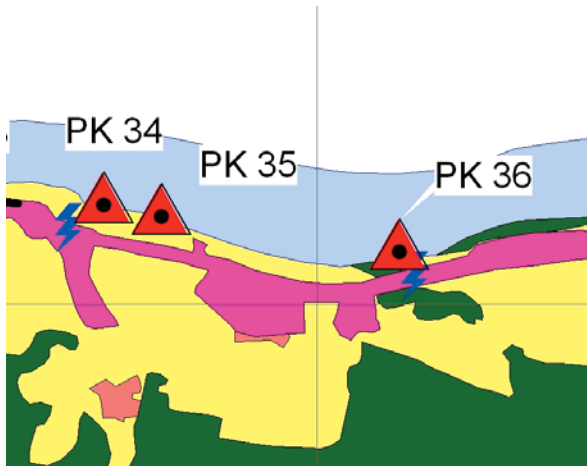
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : données indisponibles

Description :

La route est interrompue au niveau de ce site, où une large conduite d'écoulement a été détruite.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-46



Point Kondolf PK37

Coordonnées x-y : -84,252381 - 10,889064

Production sédimentaire maximale (estimation) : 890 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

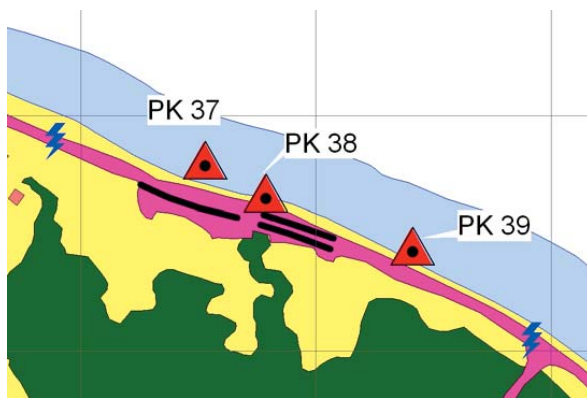
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,025 %

Description :

Pente T-81 (talus de déblai) présentant des phénomènes de ravinement.

Pente afférente : T-81

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK38

Coordonnées x-y : -84,251092 - 10,888361

Production sédimentaire maximale (estimation) : 390 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

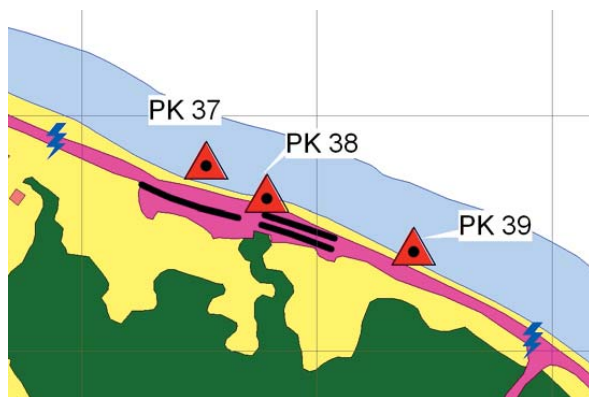
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,011 %

Description :

Talus de déblai présentant des phénomènes de ravinement.

Pente afférente : T-82

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK39

Coordonnées x-y : -84,247971 - 10,887251

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

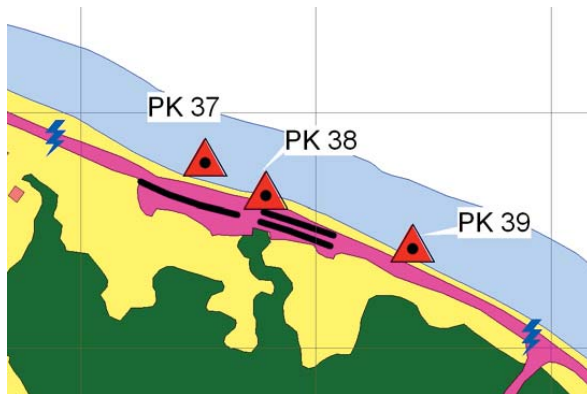
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Aucune source sédimentaire visible sur ce site.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK40

Coordonnées x-y : -84,221807 - 10,867978

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

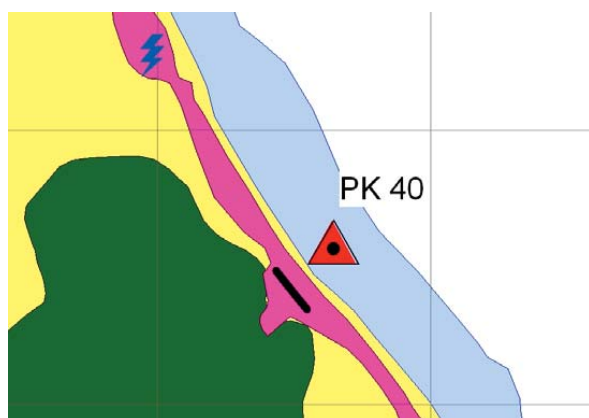
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Les apports sédimentaires sont essentiellement liés à la présence d'une exploitation agricole et à ses activités d'élevage, et nullement à la route frontalière.

Pente afférente : T-84

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK41

Coordonnées x-y : -84,224737 - 10,802815

Production sédimentaire maximale (estimation) : 30 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

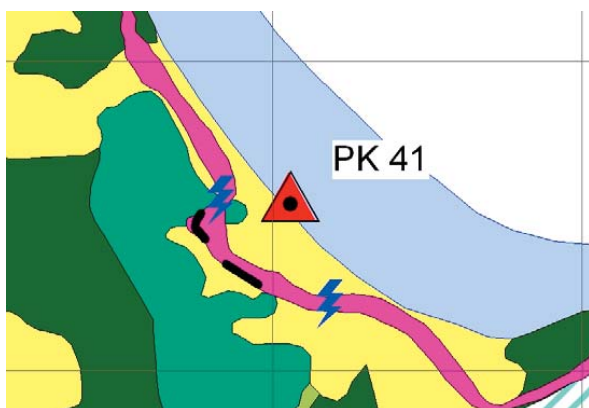
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,001 %

Description :

La production sédimentaire est due à l'érosion qui affecte la partie supérieure du bassin hydrographique, l'apport sédimentaire des pentes liées à la route demeurant très secondaire.

Pentes afférentes : T-92, T-93

Cours d'eau afférent : C-61



Point Kondolf PK42

Coordonnées x-y : -84,203566 - 10,799494

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 3 559 500 t/an

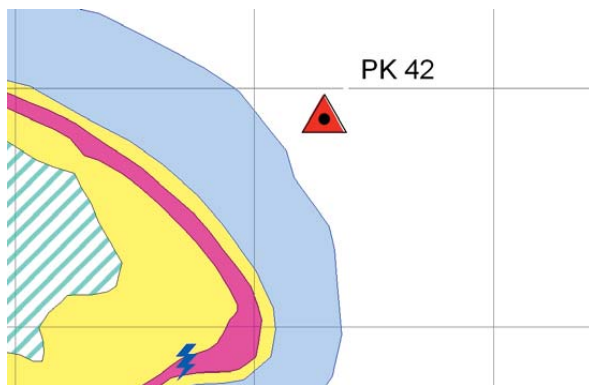
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site faisant partie du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK43

Coordonnées x-y : -84,188654 - 10,790028

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

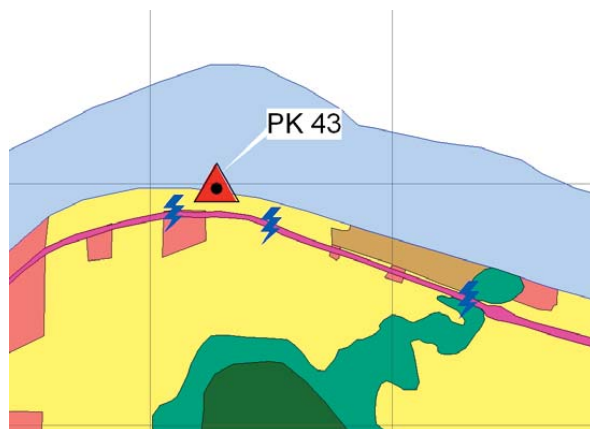
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Conduite d'écoulement provisoire, actuellement en état satisfaisant ; aucun signe d'érosion ni de sédimentation dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-67





Point Kondolf PK44

Coordonnées x-y : -84,176205 - 10,786282

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

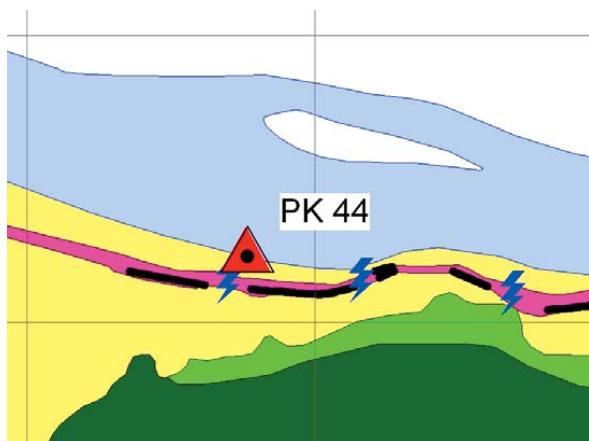
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Conduite d'écoulement en état satisfaisant ; aucun signe d'érosion ni de sédimentation dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-70



Point Kondolf PK45

Coordonnées x-y : -84,156595 - 10,786223

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

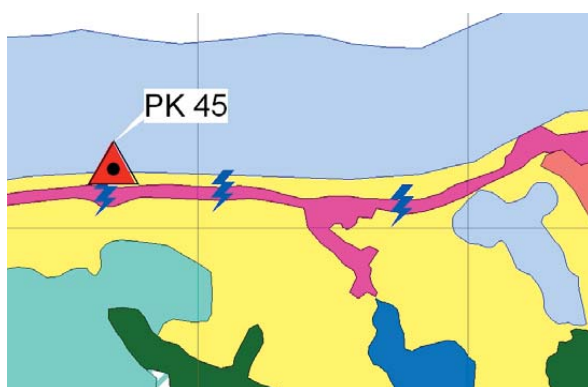
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Conduite d'écoulement provisoire actuellement en état satisfaisant ; aucun signe d'érosion ni de sédimentation dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-76



**Point Kondolf PK46**

Coordonnées x-y : -84,132591 - 10,783828

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Rigole présentant une érosion légère en aval de la route.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-80





Point Kondolf PK47

Coordonnées x-y : -84,123554 - 10,764318

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

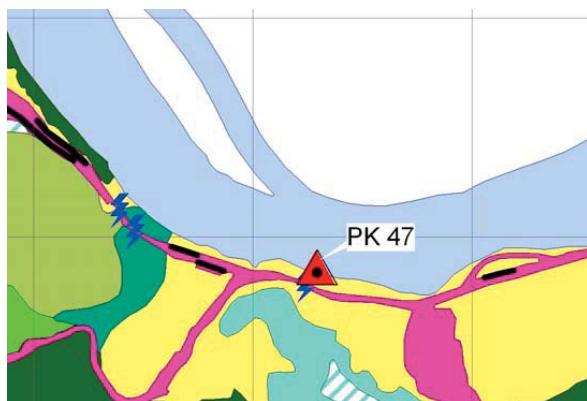
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Conduite d'écoulement provisoire actuellement en état satisfaisant ; aucun signe d'érosion ou de transport de sédiments en lien avec la route ; faibles dépôts sédimentaires dans le San Juan causés par la présence d'une construction en bordure du fleuve.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-85



Point Kondolf PK48

Coordonnées x-y : -84,087589 - 10,771606

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

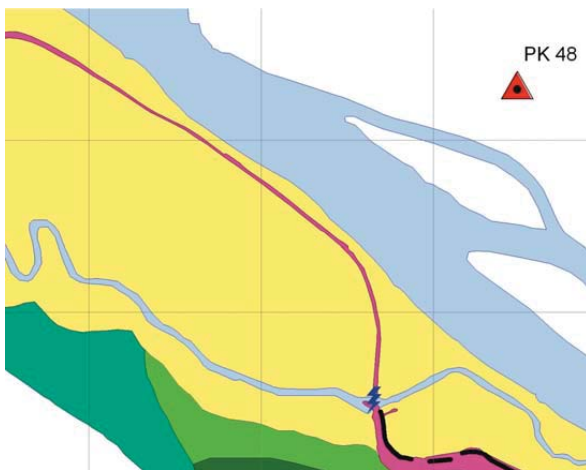
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site faisant partie du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK49

Coordonnées x-y : -84,084951 - 10,761729

Production sédimentaire maximale (estimation) : source érosive, mais aucune estimation à ce stade

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

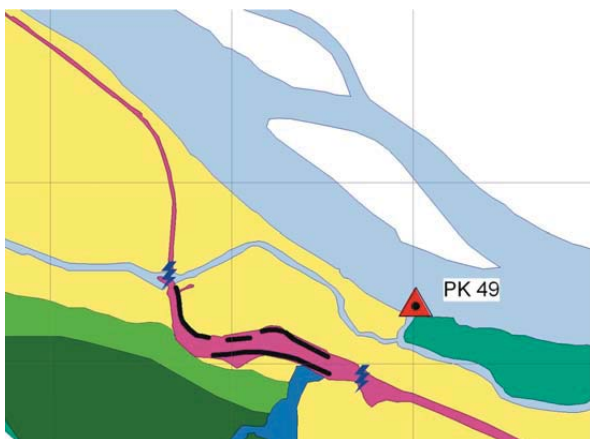
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : données indisponibles

Description :

Lieu où se jettent dans le San Juan le caño Cureña (C-86) et un autre cours d'eau moins important (C\_87) ayant tous deux des effets érosifs ; on observe toutefois sur les deux dernières photographies aériennes de la page suivante que, lorsque ces clichés ont été pris, la charge sédimentaire du San Juan était largement supérieure à celle de son affluent.

Pentes afférentes : T-114, T-115

Cours d'eau afférent : C-86, C-87





*Border Road N° 1856 – Evaluation of the 54 Sites of Purported Direct Sediment Delivery mentioned by Ph.D. Mathias Kondolf 67*



Point Kondolf PK50

Coordonnées x-y : -83,995491 - 10,760629

Production sédimentaire maximale (estimation) : 40 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

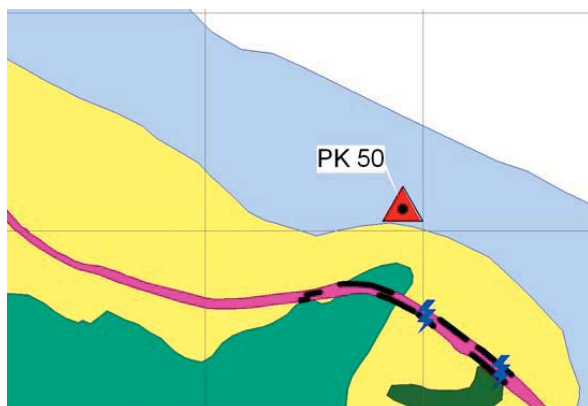
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,006 %

Description :

Site très probablement lié à la pente T-153 (talus de remblai) ; le transport de sédiments en direction du San Juan est bloqué par la présence d'une plaine qui agit comme une zone tampon entre la pente et le fleuve.

Pente afférente : T-152

Cours d'eau afférent : néant





Point Kondolf PK51

Coordonnées x-y : -83,985908 - 10,761695

Production sédimentaire maximale (estimation) : 0 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

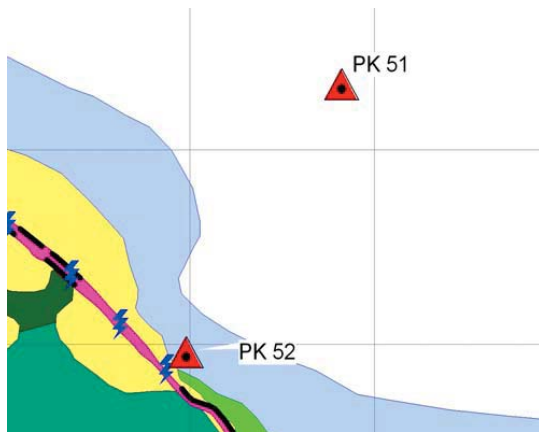
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Site faisant partie du territoire nicaraguayen.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : néant



Point Kondolf PK52

Coordonnées x-y : -83,990118 - 10,754811

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 3 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

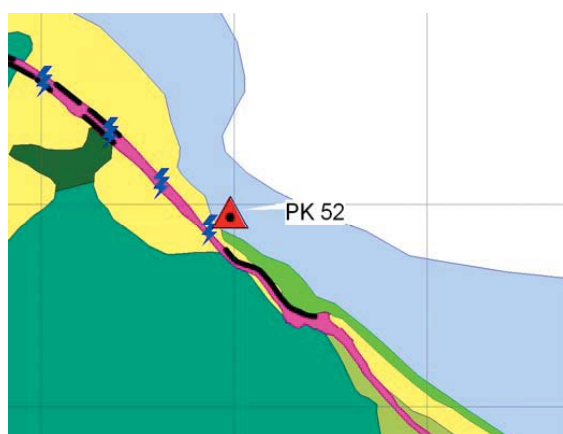
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Conduite d'écoulement provisoire (C-98) ; quelques signes d'érosion et de transport limité de sédiments.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-99





Point Kondolf PK3

Coordonnées x-y : -83,969122 - 10,736112

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 7 753 350 t/an

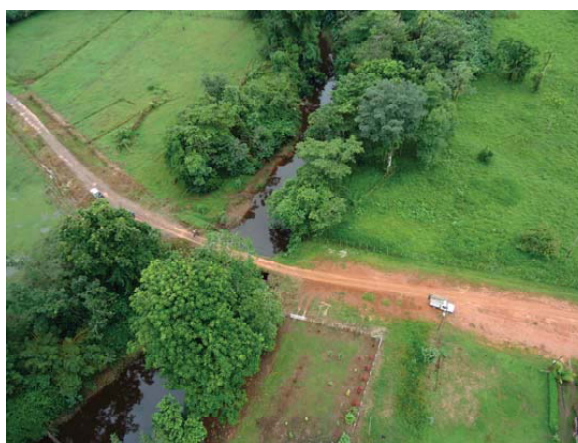
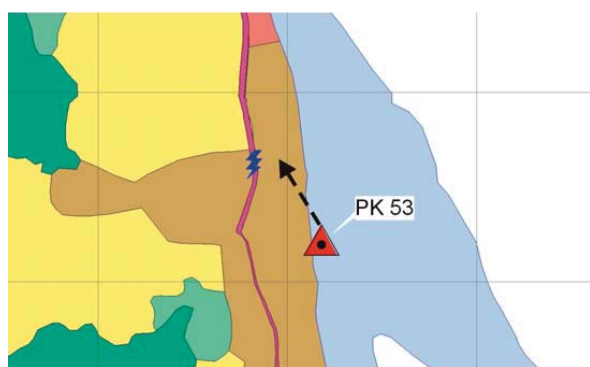
Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Pont provisoire enjambant un petit cours d'eau (C-100) sans aucun signe d'érosion ni de sédimentation dans le San Juan ; les eaux du cours d'eau C-100 présentent une turbidité beaucoup moins élevée que celles du San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-100



Point Kondolf PK54

Coordonnées x-y : -83,918261 - 10,710488

Production sédimentaire maximale (estimation) : < 1 t/an

Volume sédimentaire charrié dans le fleuve San Juan à hauteur de ce site : 8 949 300 t/an

Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire : 0,000 %

Description :

Pont sur le caño Negro (C-109), cours d'eau aux berges stables et non érosives ; aucun signe visible de transport sédimentaire dans le San Juan.

Pente afférente : néant

Cours d'eau afférent : C-109



## 1. Conclusions

Les tableaux n<sup>os</sup> 1 et 2 ci-après reprennent les données relatives aux 54 sites du rapport Kondolf.

Le tableau n<sup>o</sup>1 récapitule l'ensemble des valeurs de production sédimentaire maximale, et les compare au volume sédimentaire charrié dans le fleuve au niveau de chaque site correspondant. Le tableau n<sup>o</sup> 2 présente les mêmes données, regroupées cette fois par intervalles de production sédimentaire maximale, accompagnés des pourcentages correspondants du volume sédimentaire total charrié par le San Juan.

Il est apparu, au fil des analyses, que 7 des 54 sites indiqués par M. Kondolf (soit 13 %) se trouvent non pas au Costa Rica mais au Nicaragua. Il ne leur a donc été attribué aucune production sédimentaire, ni en valeur absolue ni en pourcentage, dans le cadre de la présente étude. Par ailleurs, dans 23 cas (42,6 % des sites évoqués), nous n'avons pu trouver aucun élément confirmant les conclusions de M. Kondolf quant à la présence de dépôts sédimentaires provenant directement de la route. Les photographies correspondantes permettent au contraire d'établir que la route n'a causé aucun dommage au San Juan dans son ensemble. Ainsi, au total, 30 des 54 sites (soit 55,6%) ne révèlent aucun élément factuel permettant d'étayer les conclusions de M. Kondolf.

Pour 5 sites, la production sédimentaire maximale se situe entre 1 et 100 tonnes par an, soit 0,001 à 0,003 % du volume sédimentaire charrié dans le San Juan. Ces faibles pourcentages incitent à ne tenir aucun compte des sites en question, les volumes sédimentaires habituellement charriés par le San Juan étant extrêmement élevés.

Pour 7 sites (13 %), la production sédimentaire maximale se situe entre 100 et 1000 tonnes par an, soit 0,001 à 0,025 % du volume sédimentaire. Un apport de cet ordre pourrait éventuellement avoir des effets néfastes sur un fleuve de moindre dimension transportant de faibles volumes sédimentaires ; or le San Juan a une charge sédimentaire extrêmement importante, ainsi qu'il ressort du rapport de Gomez-Delgado *et al.* (2013).

La production sédimentaire maximale se situe entre 1000 et 5600 tonnes par an (0,025 à 0,160 % du volume sédimentaire) pour 9 sites (16,7 %). Là encore, pour tout autre fleuve présentant une charge sédimentaire plus faible que celle du San Juan, pareil apport pourrait s'avérer problématique. S'agissant du San Juan, en revanche, une production comprise entre 0,024 % et 0,160 % est négligeable en comparaison des volumes que supporte le fleuve, et ne saurait causer de dommages importants. Des effets ayant néanmoins été observés dans quelques rares sites localisés, il est recommandé que le Costa Rica persiste dans les activités et les mesures mises en œuvre jusqu'à présent pour atténuer l'érosion et la sédimentation, lesquelles se sont révélées efficaces.

Site répertorié dans le rapport Kondolf	Production sédimentaire maximale <sup>1</sup>	Volume sédimentaire charrié par le San Juan	Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire transporté
1	740 t/year	3 362 000 t/an (entre la borne II et l'Infiernillo)	0.022 %
2	360 t/year		0.011 %
3	0 t/year		0.000 %
4	< 1 t/year		0.000 %
5	260 t/year		0.008 %
6	1,200 t/year		0.035 %
7	< 1 t/year		0.000 %
8	340 t/year		0.010 %
9	0 t/year		0.000 %
10	< 1 t/year		0.000 %
11	0 t/year		0.000 %
12	4,000 t/year		0.119 %
13	< 1 t/year		0.000 %
14	< 1 t/year		0.000 %
15	< 1 t/year		0.000 %
16	< 1 t/year		0.000 %
17	300 t/year		0.009 %
18	5,580 t/year	3 559 500 t/an (entre l'Infiernillo et le San Carlos)	0.157 %
19	2,160 t/year		0.003 %
20	0 t/year		0.047 %
21	2,070 t/year		0.058 %
22	< 1 t/year		0.000 %
23	< 1 t/year		0.000 %
24	0 t/year		0.049 %
25	2,250 t/year		0.063 %
26	4500 t/an (site 27 compris)		0.126 %
27	Voir site 26		0.126 %
28	3,400 t/year		0.095 %
29	5,000 t/year		0.141 %
30	< 1 t/year		0.000 %
31	50 t/year		0.001 %
32	< 1 t/year		0.000 %
33	90 t/year		0.002 %
34	< 1 t/year		0.000 %
35	< 1 t/year	0.000 %	
36	Données non disponibles	Données non disponibles	
37	890 t/year	0.025 %	
38	390 t/year	0.011 %	
39	< 1 t/year	0.000 %	
40	< 1 t/year	0.000 %	
41	30 t/year	0.001 %	
42	0 t/year	0.000 %	
43	< 1 t/year	0.000 %	
44	< 1 t/year	7 753 350 t/an (entre le San Carlos et le Sarapiquí)	0.000 %
45	< 1 t/year		0.000 %
46	< 1 t/year		0.000 %
47	< 1 t/year		0.000 %
48	0 t/year		0.000 %
49	Données non disponibles		Données non disponibles
50	40 t/year		0.001 %
51	0 t/year		0.000 %
52	< 3 t/year		0.000 %
53	< 1 t/year		0.000 %
54	< 1 t/year	8 949 300 t/an (entre le San Carlos et Delta Costa Rica)	0.000 %

**Tableau n° 1 Récapitulatif des données recueillies pour les 54 sites évoqués par le rapport Kondolf *et al.* (2012) : sont signalés en vert les sites où aucun apport sédimentaire n'a pu être détecté, en orange ceux où un possible apport sédimentaire a été détecté, et en gris, ceux qui ne sont pas situés au Nicaragua.**

(<sup>1</sup>) Sur la base des données du rapport Mende & Astorga (2013)

(<sup>2</sup>) Sur la base des données du rapport Gomez-Delgado *et al.* (2013)



<b>Production sédimentaire maximale<sup>1</sup></b>	<b>Production sédimentaire maximale en pourcentage du volume sédimentaire charrié dans le San Juan<sup>2</sup></b>	<b>Nombre de sites Kondolf concernés</b>
Sites situés au Nicaragua	0,000 %	7
0 – 1 t/an	0,000 %	23
1 – 100 t/an	0,001 – 0,003 %	5
100 – 1000 t/an	0,003 – 0,025 %	7
1000 – 5600 t/an	0,025 – 0,160 %	9
Données non disponibles / sites non pris en compte <sup>3</sup>	-----	3
<b><i>Total</i></b>		<b><i>54</i></b>

**Tableau n° 2 : Récapitulatif des données relatives aux 54 sites évoqués par le rapport Kondolf *et al.* (2012) présentées par intervalles de production sédimentaire maximale et pourcentages correspondants des volumes charriés dans le San Juan.** <sup>(1)</sup> Sur la base des données du rapport Mende & Astorga (2013). <sup>(2)</sup> Sur la base des données du rapport Gomez-Delgado *et al.* (2013). <sup>(3)</sup> Le site 27 n'a pas été pris en compte car sa production sédimentaire est déjà comprise dans la valeur fournie pour le site 26.

## 2 Références

Allan Astorga G. et Andreas Mende, Route 1856 : analyse de l'évolution de l'utilisation des terres d'après les images satellite prises avant et après la construction de la route frontalière, 2013, San José, Costa Rica.

F. Gomez-Delgado, J.J. Leitón-Montero, et C.A. Aguilar-Cabrera, régie costa-ricienne d'électricité (ICE), Rapport sur l'hydrologie et les sédiments des bassins hydrographiques costa-riciens dont les eaux sont drainées par le fleuve San Juan, 2013, San José, Costa Rica

G. Mathias Kondolf, Danny Hagans, Bill Weaver et Eileen Weppner, Impacts environnementaux de la route Juan Rafael Mora Porras, ou route 1856 (Costa Rica), sur le fleuve San Juan (Nicaragua), 2012.

Andreas Mende et Allan Astorga G., Inventaire des pentes et cours d'eau liés à la route frontalière 1856 entre la borne II et Delta Costa Rica, 2013, San José, Costa Rica.



## ANNEXE 6

### ANDREAS MENDE ET ALLAN ASTORGA, «INVENTAIRE DES PENTES ET COURS D'EAU LIÉS À LA ROUTE FRONTALIÈRE 1856 ENTRE LA BORNE II ET DELTA COSTA RICA», OCTOBRE 2013

Etabli par :

M. Andreas Mende  
Expert international en systèmes d'information  
géographiques (SIG)

A l'intention de :

Ministère des affaires étrangères  
Gouvernement du Costa Rica

En collaboration avec :

M. Allan Astorga  
Expert international en géologie environnementale et  
gestion des sols

San José, Costa Rica  
Octobre 2013

## 1. Introduction

Le présent rapport dresse un inventaire complet de l'ensemble des talus de déblai, des talus de remblai et des intersections (ou points de passage) de cours d'eau situés le long de la route 1856 entre la borne II, à l'endroit où la route frontalière avoisine pour la première fois le fleuve San Juan, et Delta Costa Rica, où elle prend fin.

En appliquant les données de profondeurs d'érosion et d'affaissement de la surface du terrain liées à l'érosion en nappe, en rigoles et en ravines figurant dans le rapport d'Oreamuno Vega et Roberto Villalobos Herrera de l'Université du Costa Rica (rapport de l'UCR d'octobre 2013), nous avons estimé les apports sédimentaires issus de l'ensemble des talus de déblai et de remblai présents le long de la route frontalière entre la borne II et Delta Costa Rica. Les calculs d'apports sédimentaires ont ensuite été transmis à Federico Gómez Delgado, Juan José Leitón Montero et Carlos Aguilar, du service de l'hydrologie du centre d'études en ingénierie de la régie costa-ricienne d'électricité. Les apports, ainsi que les calculs d'apports sédimentaires liés à l'érosion en nappe et en rigoles du «lit» de la route et d'autres zones affaissées, leur ont permis de fournir une estimation de l'érosion globale et des dépôts de sédiments provenant de la route 1856 vers le système du fleuve San Juan (ICE, 2013).

## 2. Méthodologie

L'inventaire des talus de déblai et de remblai et des intersections et points de passage de cours d'eau a été effectué entre avril et août 2013. Il a été établi à partir de nombreux relevés effectués sur le terrain, d'une navigation sur les fleuves costa-riciens et de survols en hélicoptère, puis complété par l'examen d'images satellites haute résolution.

Les lignes directrices suivantes ont présidé à l'établissement de l'inventaire :

- Un code d'identification unique a été attribué à chaque élément (C-1, C-2, etc. pour les intersections/points de passage de cours d'eau et T-1, T-2, etc. pour les talus de déblai et de remblai), afin d'établir un registre complet et une nomenclature homogène en vue de la présente étude et des suivantes.

- Des données d'attribut pour les talus et cours d'eau ont été collectées et saisies dans des fiches de consignation des données conçues pour l'occasion, afin de garantir la normalisation et l'exhaustivité des données enregistrées (voir figures 1 et 2).

<b>Code d'identification :</b>							
<b>Date :</b>		<b>Date :</b>				<b>Date :</b>	
<b>Type de talus</b>		<b>Coordonnées GPS</b>		<b>Hauteur</b>		<b>Emplacement (par rapport à l'aval du fleuve San Juan)</b>	
1	Talus de remblai	Début		Hauteur moyenne (m)		1	Droite
2	Talus de déblai	Fin		Hauteur maximale (m)		2	Gauche
		Emplacement supplémentaire					
<b>Caractéristiques :</b>							
<b>Mesures d'atténuation</b>		<b>Erosion</b>		<b>Géologie</b>			
1	Aucune	1	aucune	1		Complexe ophiolitique de Tiricias	
2	Géotextiles	2	Erosion en nappe	2		Turbidites de l'Éocène/du Paléocène	
3	Contrôle de l'écoulement	3	Rigoles	3		Roches volcaniques et volcanoclastiques du Tertiaire	
4	Stabilisation par terrasses	4	Ravines	4		Roches volcaniques du Quaternaire	
5	Végétation semée	5	Glissements de terrain	5		Roches volcanoclastiques du Quaternaire	
6	Végétation naturelle			6		Brèches volcanoclastiques à grains grossiers	
				7		Remblai	
<b>Erosion</b>							
<b>Erosion en nappe</b>		<b>Rigoles</b>		<b>Ravines</b>		<b>Glissements de terrain</b>	
	% zone touchée		% zone touchée		% zone touchée		% zone touchée
					Profondeur (m)		Longueur (m)
					Largeur (m)		Hauteur (m)
<b>Géologie / Géomorphologie :</b>							
<b>Commentaires :</b>							

**Figure 1 : Fiche de données utilisée pour la collecte de données de terrain relative aux talus**

- Les données d'attribut ont été stockées dans une base de données Access conçue spécialement pour le projet et à cet effet. Une normalisation de second degré de la base de données a été effectuée afin d'en optimiser l'exploitation en vue d'une analyse. Les données figurant dans la base de données ont été géoréférencées dans un environnement ArcMAP GIS, grâce à une connexion OLE DB reposant sur des codes d'identification uniques pour chaque talus et chaque cours d'eau.
- L'emplacement de chaque élément a été établi sur le terrain à l'aide d'un GPS de haute précision (précision moyenne de l'ordre de 1 m). Pour ce qui est des talus, les coordonnées

GPS des points de départ et d'arrivée de l'élément concerné ont été enregistrées, tandis que pour les cours d'eau, le(s) point(s) d'intersection avec la route frontalière ont été relevés. Pour ce qui est des ponts de plus de 5 mètres de longueur, les points de départ et d'arrivée de la structure ont été enregistrés à l'aide du GPS.

- L'état actuel de chacun des talus et cours d'eau a été recensé à l'aide de photographies numériques. Les numéros et descriptions des photographies figurent dans la base de données Access.

<b>Code d'identification :</b>					
<b>Date :</b>		<b>Emplacement :</b>		<b>Collaborateur :</b>	
Données générales :					
Remblai		Coordonnées GPS		Canalisation de drainage	
0	Absent	Point d'intersection 1		Diamètre (m)	
2	Présent	Point d'intersection 2		Orientation horizontale (°)	
		Emplacement supplémentaire			
<b>Caractéristiques :</b>					
Type de structure		Etat technique actuel		Sédimentation	
1	Remblai bouché	1	Bouché	0	Absente
2	Remblai avec canalisation de drainage	2	Provisoire	1	Présente
3	Remblai avec pont	3	Amélioré		
4	Remblai avec troncs d'arbres	4	Correct	Erosion	
5	Pont sans remblai	5	Hors d'usage	0	Absente
6	Sans construction			1	Présente
<b>Géologie / Géomorphologie :</b>					
<b>Commentaires :</b>					

**Figure 2 : Fiche de données utilisée pour la collecte de données de terrain relatives aux intersections et points de passage de cours d'eau**

### 3. Collecte de données

Cette section présente les ensembles de données collectés pour les talus et cours d'eau (voir les fiches utilisées pour la collecte de données de terrain aux figures 1 et 2).

Les données administratives relatives à chaque élément comprennent le code d'identification unique, la date de la visite de terrain, une courte description de l'emplacement, le nom de la personne qui a procédé à la collecte, ainsi que les coordonnées GPS.

Pour ce qui est des intersections et points de passage de cours d'eau, les fiches incluent le **type de structure** (*choix possibles*: remblai bouché, remblai avec canalisation de drainage, remblai avec pont, remblai avec troncs d'arbres, pont sans remblai, sans construction) et l'**état technique actuel** (*choix possibles*: bouché, provisoire, amélioré, approprié, hors d'usage, sans aucune construction). De surcroît, la présence/l'absence de **processus de sédimentation/d'érosion** et l'**utilisation** (potentielle) **de remblai** pour les points de passage sont

enregistrées. Des champs de texte libre destinés aux descriptions des caractéristiques géologiques et/ou géomorphologiques et à tout autre commentaire d'ordre général viennent compléter la fiche.

Pour ce qui est des talus, les fiches incluent le **type de talus** (*choix possibles*: *talus de remblai ou talus de déblai*), les hauteurs moyenne et maximale du talus et le côté de la route sur lequel l'élément se situe (*choix possibles*: *gauche ou droite par rapport à l'aval du fleuve San Juan adjacent*). Les hauteurs des talus ont été estimées visuellement sur le terrain afin de pouvoir mener la collecte de données à son terme dans un délai raisonnable.

Les données spécifiques aux talus sont notamment les caractéristiques d'érosion (*choix possibles*: *aucune, érosion en nappe, rigoles, ravines, glissements de terrain*) et l'unité stratigraphique géologique (*choix possibles*: *complexe ophiolitique de Tiricias, turbidites de l'Éocène/du Paléocène, roches volcaniques et volcanoclastiques du Tertiaire, roches volcaniques du Quaternaire, roches volcanoclastiques du Quaternaire, brèches volcanoclastiques à grains grossiers, remblai*).

Les observations relevées sur le terrain incluent également une estimation de la **proportion de l'élément concerné par chaque type d'érosion** (*réponse*: *pourcentage de la superficie totale du talus*). Il n'a pas été constaté de recoupement entre les zones concernées par chaque type d'érosion ; le total des pourcentages des classes d'attribut (*aucune, érosion en nappe, rigoles, ravines, glissements de terrain*) est donc toujours de 100 % de la superficie totale du talus.

Enfin, il a été noté la présence de mesures d'atténuation (*choix possibles*: *aucune, géotextiles, contrôle de l'écoulement, stabilisation par terrasses, végétation semée, végétation naturelle, pièges à sédiments*). Comme pour les cours d'eau, des champs de texte libre destinés aux descriptions des caractéristiques géologiques et/ou géomorphologiques et aux commentaires d'ordre général viennent compléter la fiche.

#### 4. Répartition spatiale des talus et cours d'eau

Nous présentons à la figure 3 une carte d'ensemble indiquant les emplacements de tous les talus et intersections de cours d'eau le long de la route entre la borne II et Delta Costa Rica. Les tableaux 1 et 2 présentent des informations synthétiques concernant la répartition spatiale des talus et cours d'eau, regroupés en quatre portions de la route :

- 1) de la borne II au fleuve Infiernito (13,8 km),
- 2) du fleuve Infiernito à la rivière San Carlos (27,6 km),
- 3) de la rivière San Carlos à la rivière Sarapiquí (43,6 km) et
- 4) de la rivière Sarapiquí à Delta Costa Rica (22,6 km).

La carte présentée à la figure 3 et les informations fournies par les tableaux 1 et 2 font ressortir un schéma clairement défini de répartition et de densité spatiales des talus et intersections de cours d'eau, que l'on abordera plus loin.

Les intersections de cours d'eau sont plus nombreuses et plus denses dans le tronçon n° 1 (34 cours d'eau, 2,5 intersections par kilomètre). Le tronçon n° 1 regroupe également la longueur et la proportion les plus élevées de talus (9,4 km de longueur, soit 68 % de la longueur de la route entre la borne II et le fleuve Infiernito). Le tronçon n° 2 présente lui aussi un nombre et une densité relativement élevés de cours d'eau (34 cours d'eau, 1,3 intersection par kilomètre). Dans le tronçon n° 2, on observe des talus le long de 7,9 km de la route, soit sur 29 % de la longueur de la route concernée par ce tronçon.

Le tronçon n° 3 compte 43 cours d'eau, mais les intersections y sont plus espacées, car ce tronçon est plus long (43,6 km), ce qui fait à peine 1 intersection par kilomètre. Dans le tronçon n° 2, des talus sont présents le long de 6,7 km de la route, soit sur 15 % des 43,6 km de la route sur ce segment.

On ne compte que 10 cours d'eau dans le tronçon n° 4, entre la rivière Sarapiquí et Delta Costa Rica, soit une densité de 0,4 intersection par kilomètre. De même, on ne dénombre que 10 talus dans ce tronçon de bas-relief, soit 5 % seulement de la longueur de la route.

**Figure 3 : Carte d'ensemble indiquant les emplacements de tous les talus et intersections de cours d'eau le long de la route 1856 entre la borne II et Delta Costa Rica**

Tronçon de route	Longueur du tronçon (km)	Talus (nombre)	Talus (longueur totale)	Talus (pourcentage de la longueur du tronçon de route)
Tronçon n° 1 — de la borne II au fleuve Infiernito	13,8 km	63	9,4 km	68 %
Tronçon n° 2 — du fleuve Infiernito à la rivière San Carlos	27,6 km	53	7,9 km	29 %
Tronçon n° 3 — de la rivière San Carlos à la rivière Sarapiquí	43,6 km	64	6,7 km	15 %
Tronçon n° 4 — de la rivière Sarapiquí à Delta Costa Rica	22,6 km	8	1,1 km	5 %
Total	107,6 km	188	25,1 km	

**Tableau 1 : Répartition spatiale des talus le long de la route frontalière 1856 en fonction des 4 tronçons de route établis**

Tronçon de route	Longueur du tronçon (km)	Cours d'eau (nombre)	Nombre de cours d'eau par kilomètre
Tronçon n° 1 — de la borne II au fleuve Infiernito	13,8 km	34	2,5
Tronçon n° 2 — du fleuve Infiernito à la rivière San Carlos	27,6 km	35	1,3
Tronçon n° 3 — de la rivière San Carlos à la rivière Sarapiquí	43,6 km	43	1,0
Tronçon n° 4 — de la rivière Sarapiquí à Delta Costa Rica	22,6 km	10	0,4
Total	107,6 km	122	

**Tableau 2. Répartition spatiale des cours d'eau le long de la route frontalière 1856 en fonction des 4 tronçons de route établis**

En conclusion, le nombre et la densité des intersections de cours d'eau, ainsi que les longueurs et proportions de talus diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la borne II. La répartition spatiale de ces éléments est telle qu'ils se concentrent majoritairement sur les tronçons n° 1 et 2. Le tronçon n° 3 présente une concentration plus faible, mais modérée, de cours d'eau et de talus, qui se font rares dans le tronçon n° 4.

## 5. Carte détaillée des talus et cours d'eau situés le long de la route 1856

Afin de fournir des informations cartographiques détaillées relatives aux intersections de cours d'eau et aux talus situés le long de la route 1856 entre la borne II et Delta Costa Rica, nous avons établi 16 cartes détaillées à l'échelle 1:15 000. Ces cartes indiquent l'étendue de tous les talus et les emplacements de toutes les intersections de cours d'eau le long de la route. Cet



ensemble de cartes s'appuie sur les cartes d'évolution de l'utilisation des sols produites dans notre précédent rapport (Astorga et Mende, 2013).

.....

\_\_\_\_\_

**ANNEXE 7**

**RAPPORT PORTANT LA RÉFÉRENCE DVM-293-2013 EN DATE DU 8 OCTOBRE 2013 ADRESSÉ AU  
MINISTRE DES AFFAIRES ÉTRANGÈRES DU COSTA RICA, M. ENRIQUE CASTILLO BARRANTES,  
PAR LA VICE-MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT DU COSTA RICA,  
MME ANA LORENA GUEVARA FERNÁNDEZ**

Je suis heureuse de vous transmettre mes salutations et de vous tenir informé des progrès accomplis en ce qui concerne les dispositions du plan de gestion environnementale de la route Juan Rafael Mora Porras, mis en œuvre par le ministère de l'environnement et de l'énergie (Ministerio de Ambiente y Energía), en vertu du décret exécutif n° 36440-MP et du plan d'urgence générale, une situation et un procédé déclenchés par la violation par le Nicaragua de la souveraineté costaricienne.

Conformément à l'appendice n° 3 du plan susmentionné, j'expose ci-dessous les progrès accomplis à ce jour :

- 1) Afin de minimiser les effets possibles des pentes créées par la construction de la route et l'effet de cette dernière sur les ressources hydriques, nous avons signé un contrat avec l'entreprise Corporación de Desarrollo Forestal de la Zona Norte (CODEFORSA), qui met actuellement en œuvre un plan dont l'objet consiste à restaurer la couverture forestière des talus de la route 1856. Ce projet concerne douze talus au total, sur lesquels du vétiver a été planté. En outre, le CONAVI, l'entité chargée de la supervision de la construction de la route 1856, a placé des géomembranes sur les talus de pente très élevée.



Depuis le début de l'année 2012, un procédé a été instauré, afin de restaurer la couverture forestière sur la rive droite du fleuve San Juan, à l'aide d'espèces natives telles que l'arbre *Zygia longifolia*, traditionnellement utilisé par les habitants des lieux pour stabiliser le terrain à proximité des étendues d'eau. Parmi les autres espèces plantées, citons notamment le *vochysia* du Guatemala (*Vochysia guatemalensis*), l'amandier des montagnes (*Dipteryx panamensis*), le Sablier des Antilles (*Hura crepitans*) et l'ojé (*Ficus insipida*). A ce jour, environ 27 000 arbres d'espèces natives ont été plantés, qui mesurent d'un à trois mètres en fonction des espèces. Fin septembre 2013, une deuxième phase du projet de reforestation a commencé sur la rive du fleuve San Juan et devrait inclure 25 000 arbres supplémentaires, pour atteindre un total de 52 000 arbres.



**Les groupes de bénévoles reçoivent des instructions concernant la plantation des arbres.**



**Démonstration de la méthode de plantation**





**Des bénévoles restaurent la couverture végétale sur la rive du fleuve San Juan, sur le territoire costaricien.**



**Etat actuel des plantations commencées en 2012. Certains arbres mesurent plus de 2 m.**





**Des bénévoles pendant le procédé de plantation de la deuxième phase de reforestation, commencée en septembre dernier.**

Les zones plantées sont soumises à un entretien régulier, qui comprend la tonte, la fertilisation, l'élagage, l'entretien des clôtures et l'étiquetage. Tous ces soins sont assurés pendant deux ans afin de veiller à ce que les arbres poursuivent leur croissance seuls par la suite.

D'autres actions stipulées dans le plan de gestion environnementale incluent la construction de trappes à sédiments, de canalisations étagées et de fossés. Cette activité est gérée par le Consejo Nacional de Vialidad (CONAVI), responsable de la construction de la route.



**Installation d'une clôture antiérosion sur les talus.**



**Pentes recouvertes d'une géomembrane afin de prévenir le ruissellement.**





**Barrières de protection visant à prévenir le ruissellement.**



**Fossés creusés afin de canaliser les eaux de ruissellement.**



**Installation de tuyaux en ciment au niveau des petits écoulements.**



**Canalisation étagée visant à réduire la vitesse des eaux de pluie.**

Enfin, je vous informe que le ministère a mis en œuvre un plan de prévention, de contrôle et de protection afin d'accroître la surveillance de la zone. Les employés du Sistema Nacional de Áreas de Conservación (SINAC) sont responsables de la mise en œuvre dudit plan, avec l'assistance du ministère de la sécurité publique (Ministerio de Seguridad Pública). Grâce à des activités de surveillance et de contrôle, il a été possible : 1) d'obtenir un registre à jour des habitants de la région ; 2) de détecter des activités illégales, telles que la chasse illégale, l'abattage de forêts et de types de bois interdits et la saisie du bois ; 3) de démanteler la nouvelle construction de sites classés patrimoine naturel du gouvernement.

De même, la construction de trois stations de surveillance du ministère de l'environnement et de l'énergie a commencé sur trois points stratégiques situés le long de la route 1856, pour un meilleur contrôle et une plus grande protection du refuge du couloir faunique frontalier (Refugio de Vida Silvestre Corredor Fronterizo).

Veillez agréer, etc.

Ana Lorena GUEVARA FERNÁNDEZ  
Ministre déléguée chargée de l'environnement.

Copie à M. René CASTRO SALAZAR,  
Ministre de l'environnement et de l'énergie.

---



## ANNEXE 8

### CONSEIL NATIONAL DES AUTOROUTES (CONAVI), PROGRAMME DE CONSOLIDATION ET D'AMÉLIORATION CONTINUE DE LA ROUTE 1856, RÉF. DIE-02-13-3107, 25 OCTOBRE 2013

#### Programme de consolidation et d'amélioration continue de la route 1856 «Juan Rafael Mora Porras»

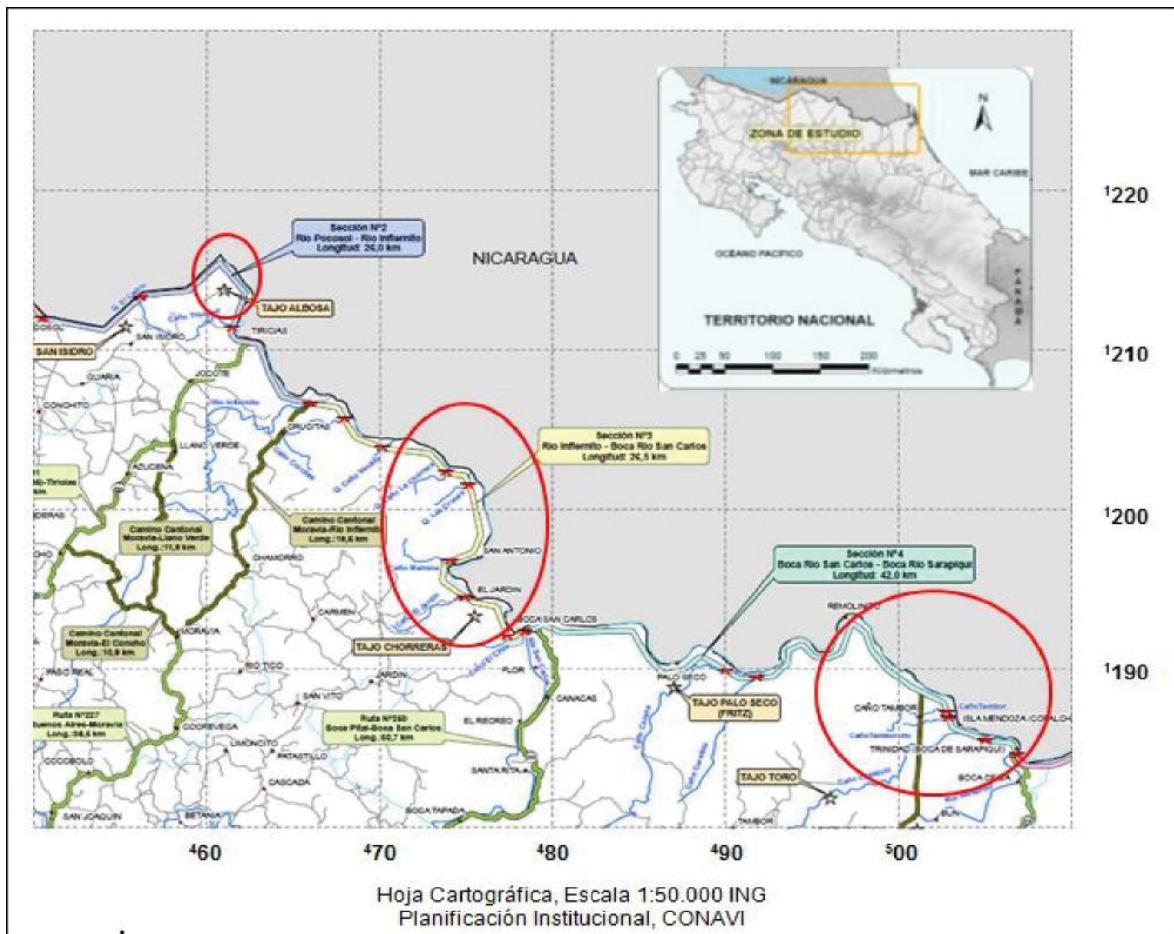
Le ministère des travaux publics et des transports (MOPT) et le conseil national des autoroutes (CONAVI) poursuivent les travaux de consolidation de la route 1856 «Juan Rafael Mora Porras» et d'examiner attentivement certains emplacements nécessitant des travaux complémentaires visant à atténuer les effets de la pluie. Tous les travaux ont pour objet la consolidation de la route et, le cas échéant, sa remise en état. Ces travaux constituent des mesures de réparation ou d'atténuation des risques pour l'environnement, leur objectif étant de gérer de façon appropriée les sédiments pouvant être générés par l'érosion et d'assurer le cheminement de l'écoulement superficiel.

Au cours des mois de février, de mars et d'avril, les travaux suivants ont été effectués :

#### Informations générales

Région :	Huetar Norte
Province :	Alajuela
Type de travaux :	travaux d'atténuation
Entreprise de construction :	MECO S.A.
Ingénieur résident (entreprise) :	Jonathan Granados Castillo
Directeur technique (entreprise) :	Benjamín Meneses Monastel
Ingénieur chargé du chantier (CONAVI) :	José Mena Carmona
Longueur :	15 km
No de marché :	2012LA-000072-0DI00
Date de signature du contrat :	5 février 2013
Date de l'ordre de démarrage des travaux :	11 février 2013
Date d'achèvement :	12 avril 2013
Statut du chantier :	terminé
Montant du contrat :	¢669 900 000,00
Durée initiale des travaux de construction :	60 jours ouvrables
Avancement matériel	100 %
Avancement financier	93,13 %

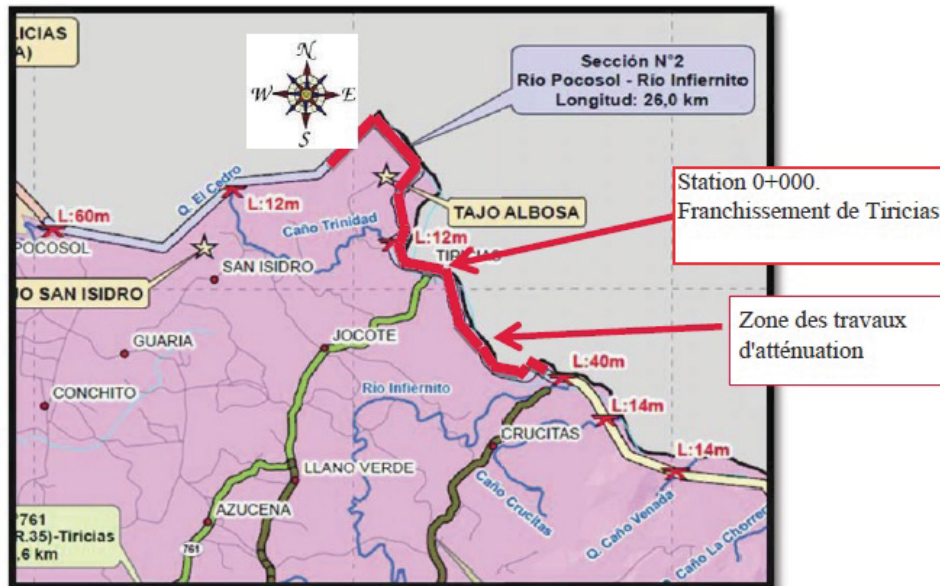
## Emplacement géographique du chantier



Les travaux ont été exécutés conformément au marché n° 2012LA-000072-ODI00, sur les tronçons 2, 3 et 4 (zone montagneuse et humide) de la route n° 1856 (Juan Rafael Mora Porras), dans les provinces 02 et 04 d'Alajuela et d'Heredia, dans les cantons 210 et 410 de San Carlos et Sarapiquí et dans les districts 13, 11 et 02 de Cutris, Pocosol et La Virgen.

## Description des travaux

Les travaux ont été effectués dans le secteur de Tiricias et le chantier s'est étendu sur une distance d'environ 15 km. La figure ci-dessous représente le secteur concerné.



Dans le cadre de ce chantier, les stations sont les suivantes : du franchissement de Tiricias (Est. 0+000) jusqu'au sud-est, les valeurs sont positives, et du franchissement de Tiricias jusqu'au nord-ouest, les valeurs sont négatives et précédées du signe moins (-).

### Travaux effectués :

- Pose de barrières de contrôle des sédiments
- Pose d'une géocouverture anti-érosion
- Creusement et obstruction des talus sur les remblais
- Pose de passages couverts d'un diamètre de 90 cm et des parois correspondantes
- Construction de fossés en béton renforcé, classe X, d'une épaisseur de 10 cm
- Creusement de chenaux et construction de pièges à sédiments
- Construction de dissipateurs d'énergie en béton d'une longueur de 15 m

Le tableau suivant présente les montants investis dans la réalisation des travaux d'atténuation, qui ont été financés par le budget de la CONAVI.

	ÉLÉMENT	UNITÉ	COÛT
1	Pose de barrières de contrôle des sédiments (clôtures anti-érosion)	m	13 447 244,98
2	Pose d'une géocouverture anti-érosion (couverture en fibre de coco)	m <sup>2</sup>	93 836 827,17
3	Creusement et obstruction des talus sur les remblais (creusement classique)	m <sup>3</sup>	115 767 909,03
4	Creusement et obstruction des talus sur les remblais (construction des remblais)	m <sup>3</sup>	124 566 092,44
5	Pose de passages couverts d'un diamètre de 90 cm et des parois correspondantes (tuyaux de béton renforcé, classe III C -76, 0,90 m de diamètre)	m	29 892 432,32
6	Construction de fossés en béton renforcé, classe X, d'une épaisseur de 10 cm	m <sup>2</sup>	21 559 648,78
7	Creusement de chenaux et construction de pièges à sédiments	m <sup>3</sup>	4 888 838,64
9	Béton renforcé structurel, classe X, 180 kg/cm <sup>2</sup> pour les dissipateurs et les têtes	m <sup>3</sup>	38 281 898,46
8	Construction de dissipateurs d'énergie en béton d'une longueur de 15 m		13 628 284,50
9	Élément 110,06		13 628 284,50
10	Construction de dissipateurs en béton, classe X	m <sup>2</sup>	202 505 265,33
		<b>TOTAL</b>	<b>672 002 726,15</b>

L'écart entre le total indiqué dans le tableau ci-dessus et le montant approuvé dans le contrat correspond à des ajustements effectués dans le cadre de la validation du contrat, une fois le processus entamé.

**Photos du chantier :**



**Photo 1.** Création de talus, pose de la fibre de coco, construction de fossés et pose d'une clôture anti-érosion



**Photo 2.** Création de talus, pose de la fibre de coco, construction de fossés et pose d'une clôture anti-érosion



**Photo 3.** Création de talus, pose de la fibre de coco et construction de fossés de crête





**Photo 4.** Construction de dissipateurs



**Photo 5.** Création de talus, construction de fossés et de fossés de crête



**Photo 6.** Pose de tuyaux, construction de parois, construction de fossés



**Photo 7.** Pose de la fibre de coco, construction de fossés



**Photo 8.** Construction de chenaux revêtus, pose de la fibre de coco et construction de fossés



**Photo 9.** Pose de la fibre de coco, construction de fossés



**Photo 10.** Création de talus, pose de la fibre de coco, construction de fossés, pose de ballast et pose d'une clôture anti-érosion



**Photo 11.** Création de talus, pose de la fibre de coco, construction de fossés et pose d'une clôture anti-érosion



**Photo 12.** Pose de la fibre de coco, construction de fossés et pose d'une clôture anti-érosion

On trouvera ci-après des tableaux comparatifs illustrant la situation avant et après la réalisation des travaux et indiquant les emplacements géographiques correspondants.



**Point 1**

Stations (-) 7+760 (-) 7+400(-) 7+350

Coordonnées GPS Lambert N 329945, E 496508

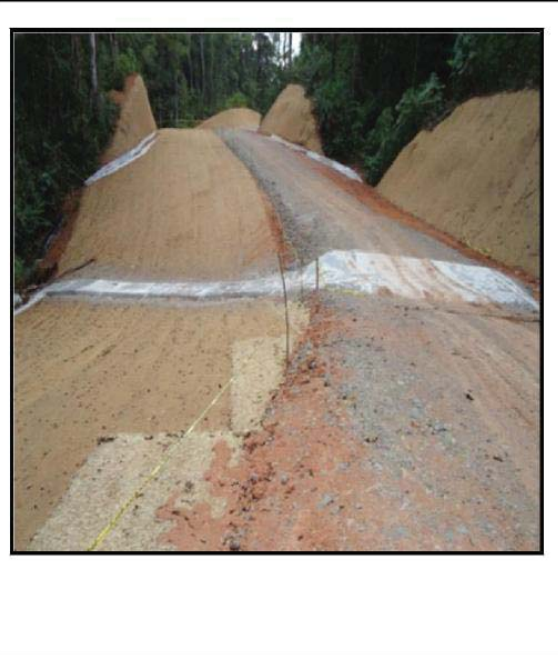
Description : En direction de la borne II. Côté droit : création des rives et pose de la géocouverture.

Creusement et revêtement de chenaux transversaux recevant l'eau de surface provenant de la zone humide et de tuyaux de béton

**AVANT**



**APRÈS**



**Point 2**

Stations (-) 7+250 (-) 7+200

Coordonnées GPS Lambert N 330352, E 496887

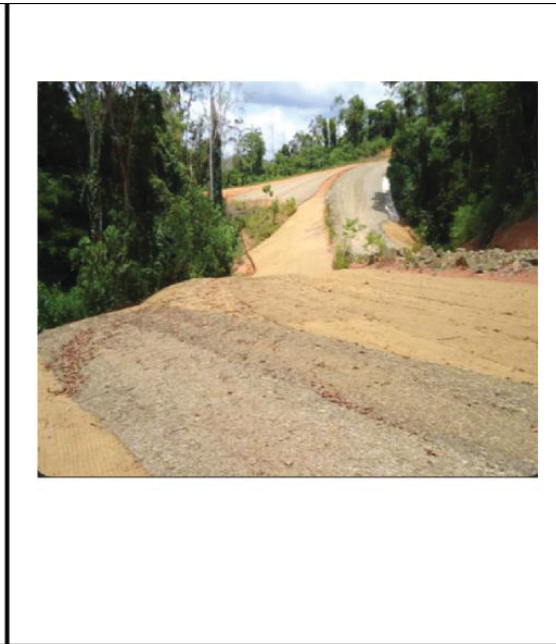
Description : En direction de la borne II. Côté droit : création des rives et pose de la géocouverture.

Creusement de chenaux transversaux recevant l'eau de surface provenant de la zone humide et d'un fossé revêtu.

**AVANT**



**APRÈS**



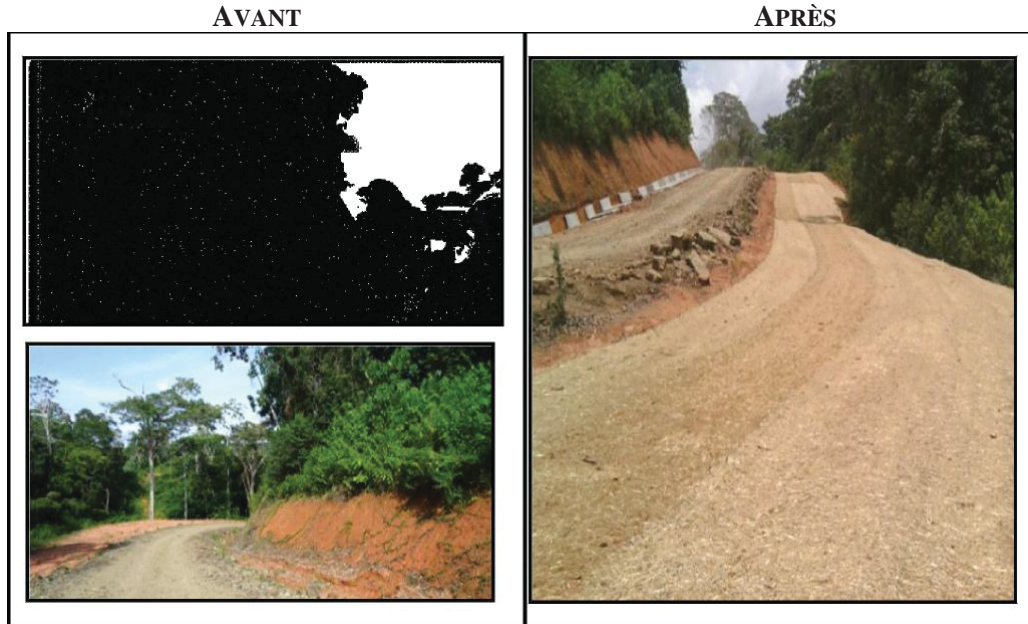


**Point 3**

Stations (-) 7+140

Coordonnées GPS Lambert N 330329, E 496942

Description : Côté gauche, côté droit — création de talus et pose de la géocouverture.  
Côté gauche — creusement de fossés, construction d'un fossé revêtu

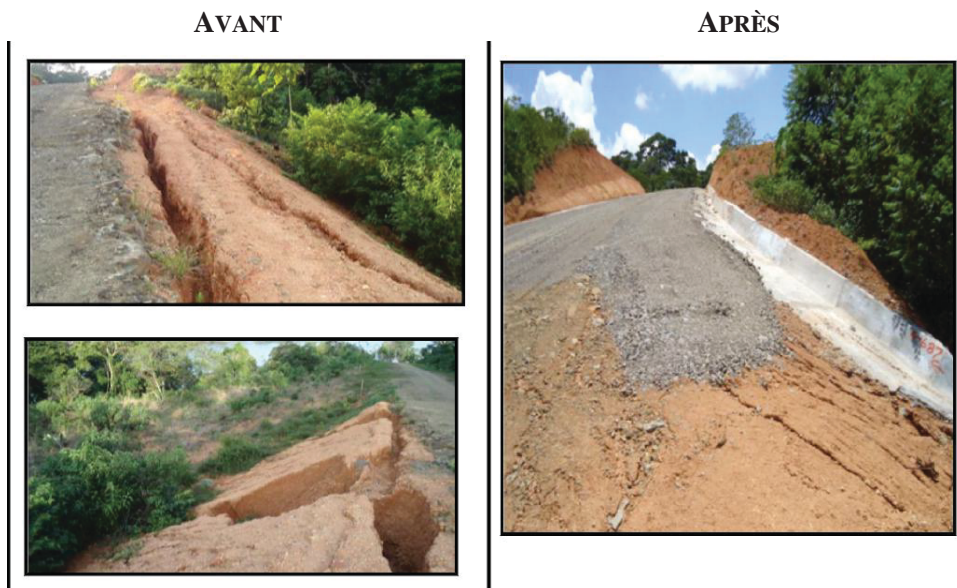


**Point 4**

Stations (-) 6+750

Coordonnées GPS Lambert N 330052, E 497114

Description : Côté gauche, côté droit — création de talus et pose de la géocouverture.  
Côté gauche, côté droit — creusement de fossés, construction d'un fossé revêtu et pose de 2 conduites d'évacuation équipées de dissipateurs



**Point 5**

Stations (-) 6+350

Coordonnées GPS Lambert N 329855, E 497430

Description : Côté gauche, construction d'une rive, pose de la géocouverture et d'un fossé revêtu  
Côté droit – affinement du talus, pose de la géocouverture et du fossé revêtu

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 6**

Stations (-) 4+576

Coordonnées GPS Lambert N 328515, E 498489

Description : Côté gauche, obstruction du talus

**AVANT**

**APRÈS**



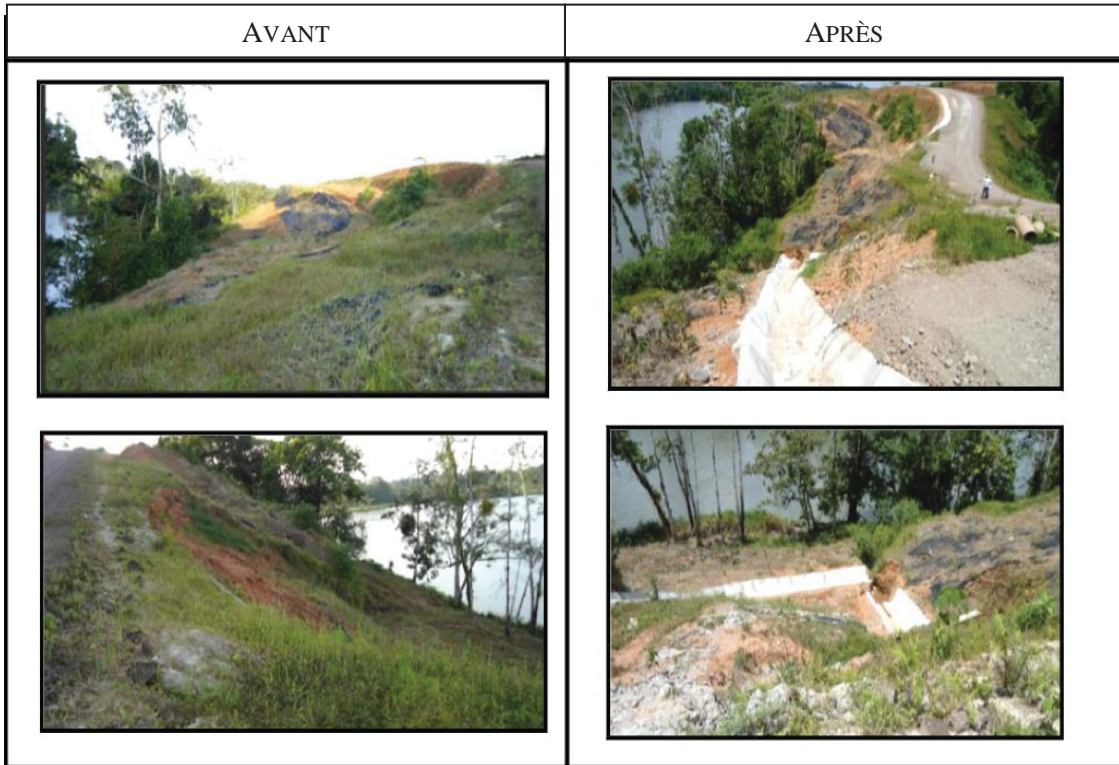


**Point 7**

Stations (-) 0+622

Coordonnées GPS Lambert N 325345, E 498072

Description : Côté droit sur 80 m — création du talus, pose de la géocouverture, construction des parois sur le passage existant et pose du revêtement du chenal d'évacuation



**Point 8**

Stations (-) 0+300

Description : Conduite d'évacuation de 90 cm de diamètre recevant l'eau de surface provenant de la zone humide, têtes et revêtement du chenal d'évacuation



**Point 9**

Stations 0+480

Coordonnées GPS Lambert N 325177, E 499060

Description : Côté droit — construction d'une pente d'évacuation et revêtement du chenal d'évacuation

**AVANT**



**APRÈS**



**Point 10**

Stations 0+550 à 0+804

Coordonnées GPS Lambert N 325163, E 499126

Description : Côté droit — Construction d'un chenal d'évacuation

**AVANT**



**APRÈS**



**Point 11**

Stations 1+109

Coordonnées GPS Lambert N 324868, E 499477

Description : Conduite d'évacuation et parois, 1,5 m de diamètre

**AVANT**



**APRÈS**



**Point 12**

Stations 1+030 1+090

Description : Côté gauche, creusement du chenal

**AVANT**



**APRÈS**





**Point 13**

Stations 1+195 - 1+365 - 1+407

Coordonnées GPS Lambert N 324757, E 499503

Description : Côté gauche — talus de 250x20 m, 250 m de fossés de crête, 500 m de clôture anti-érosion, 80 m de dissipateur (4 pour les fossés de crête). Rive gauche — construction d'un fossé revêtu, creusement du fossé. Côté droit — fossé revêtu

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 14**

Stations 2+600 - 2+657 - 2+755 - 2+890

Description : Côté droit — consolidation de la rive, pose d'un fossé revêtu, suppression des affaissements et rétrécissement des terrasses

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 15**

Stations 2+960

Description : Côté droit — création du talus, matériaux à utiliser pour d'autres activités

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 16**

Stations 3+604

Description : Côté droit — création du talus, matériaux à utiliser pour d'autres activités

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 17**

Stations 3+690 3+720 3+830 4+000

Description : Côté gauche. Dissipateurs, fossés de crête, fossés, protection par clôture anti-érosion.  
Côté gauche — construction d'un fossé revêtu et d'un dissipateur  
Côté droit — construction d'un fossé revêtu et d'un dissipateur, creusement destiné à l'obstruction de la rive à l'aide des matériaux coupés  
Côté gauche, remblai et rebouchage  
Côté droit, affaissement

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 18**

Stations 4+185

Coordonnées GPS Lambert N 322071, E 500667

Description : Fossé, fossé de crête, géocouverture de fibre de coco. Création du talus, côtés gauche et droit.  
Côté droit, rétrécissement du talus et obstruction de la rive

**AVANT**

**APRÈS**





**Point 19**

Stations 4+330

Coordonnées GPS Lambert N 321987, E 500774

Description : Conduite d'évacuation  
Creusement de tuyaux  
Obstruction des tuyaux  
Tuyaux d'un diamètre interne de 1,5 m Parois de tube d'un diamètre de 1,5 m  
Béton de classe A pour la bavette

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 20**

Stations 6+704 - 7+000

Description : Creusement de matériaux en vrac  
Création de talus  
Géocouverture anti-érosion en fibre de coco  
Barrière de contrôle des sédiments

**AVANT**

**APRÈS**



**Point 21**

Stations 7+050

Coordonnées GPS Lambert N 321779, E 500975

Description : Creusement de matériaux en vrac  
Création de talus  
Géocouverture anti-érosion en fibre de coco  
Barrière de contrôle des sédiments



**Point 22**

Stations 7+350 - 7+750

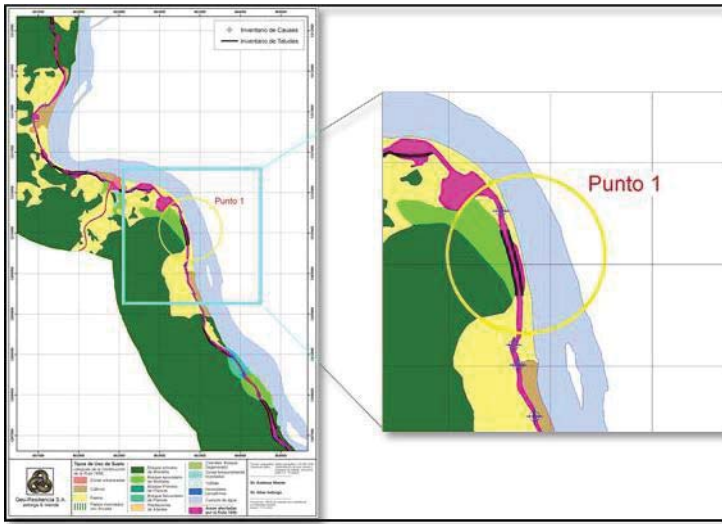
Description : Creusement de matériaux en vrac  
Création de talus  
Géocouverture anti-érosion en fibre de coco  
Barrière de contrôle des sédiments





Les travaux en cours de réalisation comprennent le nettoyage et l'entretien des travaux effectués l'année dernière et pendant les mois de février, mars et avril. De nouveaux tronçons de la route seront concernés, en particulier les secteurs identifiés à la section n° 2 Río Pocosol — Río Infiernito du présent rapport. L'ingénieur José Mena Carmona supervise la réalisation de travaux complémentaires et d'entretien.

**Point n° 1 : Talus et mesures de renforcement en cours de réalisation**

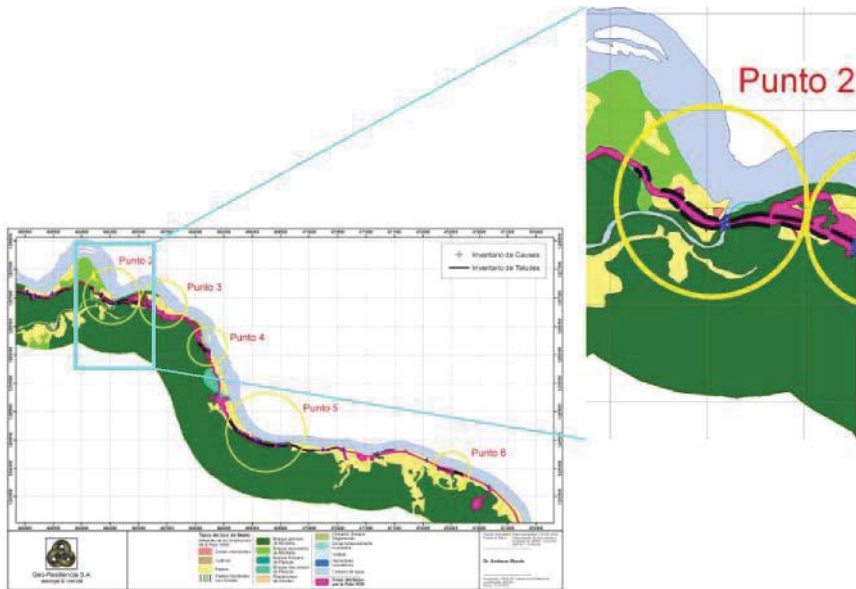


Projection Lambert Nord de  
l'emplacement :  
E : 499554 N : 324579

Un aménagement en gradins a été réalisé à cet endroit afin de créer le talus et d'éviter les glissements de terrain. Une couverture en fibre de coco est en train d'être posée pour contrôler les sédiments, en complément d'un ensemencement hydraulique et de la pose de fossés de crête visant à contrôler l'écoulement superficiel sur ce talus, ce qui le rendra imperméable et évitera le déplacement des sédiments. Une clôture anti-érosion sera également installée par mesure de précaution, afin de retenir les sédiments si ceux-ci venaient à se déplacer.



**Point n° 2 : Río Infiernito, protection et création de talus**



Projection Lambert Nord de l'emplacement : E : 502973  
N : 321544

Dans ce secteur, on procède à l'élimination des affaissements en raison de l'instabilité des talus, ainsi qu'au nettoyage du fossé revêtu afin que celui-ci retrouve sa fonction hydraulique normale.

**Travaux complémentaires à effectuer au cours des prochains mois**

**Description :**

Les travaux suivants seront effectués après la finalisation des interventions au niveau des points indiqués par l'équipe technique, qui correspondent principalement à une amélioration hydraulique de plusieurs points de ce secteur, à savoir : amélioration des conduites d'eau par la construction de canalisations équipées des protections nécessaires (parois, contreforts, bavettes), construction d'un fossé revêtu, construction de pentes d'évacuation et pose d'une clôture anti-érosion. Des travaux sont également nécessaires afin de nettoyer les chenaux et fossés.

**Point A : (Nettoyage du fossé, suppression de l'affaissement)**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 499892

N : 323218

Un affaissement, causé par une structure de talus inadaptée, a été éliminé à cet endroit. Le fossé revêtu a également été nettoyé afin qu'il conserve sa fonction hydraulique normale.

Un ensemencement hydraulique sera pratiqué dans ce secteur en vue de traiter ce talus et d'améliorer sa stabilité. Un fossé revêtu sera également construit à certains endroits concernés par l'affaissement. Voir les photos ci-dessous :





**Point B (Construction d'une canalisation) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 499560

N : 324228

Une canalisation de 1,50 m de diamètre sera installée dans ce secteur et équipée des protections nécessaires (parois, contreforts, bavettes), ainsi qu'un tronçon transversal de route de 10 m. Voir la photo ci-dessous :



**Point C (Construction d'une canalisation) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 499650

N : 323870

Une canalisation de 1,50 m de diamètre sera installée à cet endroit et équipée des protections nécessaires (parois, contreforts, bavettes), ainsi qu'un tronçon transversal de route de 10 m. Voir les photos ci-dessous :





**Point D (réparation d'un trou dans un pont de bois) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 499777

N : 323555

La réparation d'un trou dans le pont de Tucas doit être effectuée dans ce secteur. Voir la photo ci-dessous :





**Point E (Construction d'une canalisation) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 499986

N : 323171

Une canalisation de 1 m de diamètre sera installée à cet endroit et équipée des protections nécessaires (parois, contreforts, bavettes), ainsi qu'un tronçon transversal de route de 10 m. Voir la photo ci-dessous :



**Point F (réparation d'un trou dans un pont de bois) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 500256

N : 322867

La réparation d'un trou dans le pont de bois et le nettoyage du chenal (les troncs obstruant l'écoulement du fleuve) doivent être effectués dans ce secteur.



**Point G (nettoyage du chenal et du fossé) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 500445

N : 322614

Un nettoyage du dispositif de canalisations raccordé au chenal et du fossé revêtu situé sur le côté droit doit être effectué dans ce secteur. Voir les photos ci-dessous :



**Point H (construction d'une canalisation) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 321839

N : 500887

Une canalisation de 1,50 m de diamètre sera installée dans ce secteur et équipée des protections nécessaires (parois, contreforts, bavettes), ainsi qu'un tronçon transversal de route de 10 m.

**Point I (construction d'une pente d'évacuation) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 321689

N : 501233

Une pente d'évacuation sera construite dans ce secteur afin d'éviter un affaissement dû à l'écoulement des eaux de pluie dans le fossé, qui risquerait d'endommager le revêtement existant. Voir les photos ci-dessous :



**Point J (construction d'un fossé revêtu et pose d'une clôture anti-érosion) :**

Coordonnées Lambert Nord :

E : 501394

N : 321653

Un fossé revêtu sera construit à cet endroit sur 330 m, de façon discontinue, et une clôture anti-érosion sera installée afin de lutter contre le déplacement de sédiments. Voir les photos ci-dessous :





**ANNEXE 9**

**Colin Thorne, «rapport sur le risque de dommages irréversibles au fleuve San Juan  
lié à la construction de la route frontalière au Costa Rica», novembre 2013**

**Rapport sur le risque de dommages irréversibles au fleuve San Juan  
lié à la construction de la route frontalière au Costa Rica**

**Etabli par Colin Thorne, Nottingham, Royaume-Uni**

**Professeur et titulaire de la chaire de géographie physique  
à l'université de Nottingham**

**4 novembre 2013**

**TABLE DES MATIÈRES**

1. INTRODUCTION.....	325
2. MES QUALIFICATIONS .....	325
3. MANDAT.....	325
4. MÉTHODOLOGIE .....	327
5. APPORT DE SÉDIMENTS EN PROVENANCE DE LA ROUTE DANS LE FLEUVE SAN JUAN.....	328
5.1. Aperçu.....	328
5.2. Existe-t-il des preuves d'une augmentation de la charge sédimentaire dans le fleuve San Juan depuis décembre 2010 ? .....	328
5.3. L'estimation à 1 m par an du taux d'affaissement de la surface du terrain donnée dans le Rapport Kondolf de 2012 est-elle raisonnable ? .....	333
5.4. Les taux de dépôt calculés pour les sédiments issus de l'érosion de la route, tirés des résultats du suivi sur le terrain, sont-ils suffisants pour produire des dommages «significatifs» ou «irréversibles» au fleuve San Juan?.....	338
5.5. Capacité des sédiments issus de l'érosion de la route à avoir un impact sur le fleuve San Juan .....	341
5.5.1. Introduction.....	341
5.5.2. Charge annuelle estimée des sédiments issus de l'érosion de la route alimentant le fleuve San Juan .....	341
5.5.3. Charge sédimentaire annuelle moyenne dans le fleuve San Juan inférieur depuis décembre 2010 .....	342
5.5.4. Apport au fleuve San Juan de sédiments issus de l'érosion de la route.....	342
5.5.5. Impact potentiel sur la sédimentation dans le fleuve San Juan inférieur .....	343
5.5.6. Les apports de sédiments issus de l'érosion de la route ne sont pas juste insignifiants, ils sont indétectables .....	343
6. RÉPONSE AUX NOUVELLES DONNÉES TRANSMISES PAR LE NICARAGUA.....	344
7. MES OBSERVATIONS DES TRAVAUX D'ATTÉNUATION SUR LA ROUTE EN MAI 2013 .....	353
8. CONCLUSIONS SUR LE RISQUE DE DOMMAGES IRRÉVERSIBLES DU FLEUVE .....	356
9. RÉFÉRENCES.....	357
10. DÉCLARATION CERTIFIANT LE CARACTÈRE INDÉPENDANT ET VÉRIDIQUE DES OPINIONS FORMULÉES DANS LE PRÉSENT RAPPORT .....	357



## 1. INTRODUCTION

1. Je m'appelle Colin Thorne et j'enseigne la géographie physique à l'Université de Nottingham. J'ai été prié par le Costa Rica d'établir un rapport d'expert indépendant pour la Cour internationale de Justice (ci-après la Cour) concernant la demande en indication de nouvelles mesures conservatoires soumise par le Nicaragua le 11 octobre 2013 (ci-après la demande) en l'affaire relative à la *Construction d'une route au Costa Rica le long du fleuve San Juan (Nicaragua c. Costa Rica)* (ci-après l'affaire relative à la *Route*).

2. Je suis chargé d'émettre un avis d'expert indépendant sur les points exposés dans le mandat défini ci-dessous.

## 2. MES QUALIFICATIONS

3. Je suis titulaire de la chaire de géographie physique à l'université de Nottingham au Royaume-Uni. J'ai une licence et un doctorat en sciences de l'environnement de l'Université d'East Anglia au Royaume-Uni. J'ai plus de 35 ans d'expérience professionnelle dans le domaine des cours d'eau, de la sédimentation et de la morphologie fluviale. Mes travaux de recherche se concentrent sur l'hydraulique fluviale et le transport de sédiments dans les cours d'eau naturels, modifiés ou contrôlés, et en particulier sur les conséquences de l'érosion, de la sédimentation, sur les risques d'inondation et sur l'environnement fluvial.

4. J'ai déjà rendu un rapport d'expertise indépendant dans l'affaire relative à *Certaines activités* : «Evaluation de l'impact physique des travaux réalisés par le Nicaragua depuis octobre 2010 sur la géomorphologie, l'hydrologie et la dynamique des sédiments du fleuve San Juan, ainsi que sur les conséquences environnementales pour le territoire du Costa Rica», qui constitue l'annexe 1 du mémoire du Costa Rica dans l'affaire relative à *Certaines activités* (ci-après le premier rapport). J'ai également rendu un second rapport d'expertise indépendant dans l'affaire relative à *Certaines activités*, dans le cadre de la demande de mesures conservatoires déposée par le Costa Rica, datée du 24 septembre 2013. Ce rapport intitulé *Report on the Impact of the Construction of two New Caños on Isla Portillos* [Rapport sur l'impact de la construction de deux nouveaux chenaux sur Isla Portillos] date du 10 octobre 2013 (ci-après le second rapport).

## 3. MANDAT

5. Je suis chargé d'émettre un avis d'expert indépendant sur les allégations avancées dans la Demande et faisant état de déversements de sédiments sous l'effet de l'érosion de la route (y compris depuis les versants adjacents à la route et les zones perturbées), ainsi que sur le degré réel de risque imminent de dommages irréversibles que présente la route pour le fleuve San Juan.

6. Dans la demande, le Nicaragua énonce un certain nombre de risques que la route ferait courir au fleuve San Juan. Plus précisément :

i) Page 1, paragraphe 2, dernière phrase,

«[L]es travaux de construction de cette route entrepris par le Costa Rica ont entraîné un brusque accroissement de la charge sédimentaire du fleuve San Juan, qui a contraint le Nicaragua à prendre des mesures énergiques, y compris de dragage, afin de préserver la qualité et la quantité des eaux du fleuve.»

ii) Page 2, paragraphe 3, «la construction, par le Costa Rica, d'une route de 160 kilomètres le long de la rive du fleuve San Juan».

iii) Page 2, paragraphe 5, phrases quatre à six,

«Ces experts ont confirmé que le Costa Rica n'avait pris aucune mesure pour faire cesser ou simplement atténuer les graves dommages causés au fleuve San Juan de Nicaragua. En prévision de la deuxième saison des pluies depuis le début de la construction de la route, le Nicaragua a envoyé la même équipe effectuer une deuxième mission au mois de mai 2013. Les experts ont souligné qu'il convenait de mettre en œuvre d'urgence les mesures d'atténuation qu'il avait présentées à la Cour.»

iv) Page 3, paragraphe 2,

«Alors que nous arrivons au plus fort de la saison des pluies et qu'une quantité encore plus importante de sédiments se déverse dans les eaux du fleuve, le Costa Rica n'a toujours pas communiqué au Nicaragua les informations requises, et n'a pas non plus pris les mesures nécessaires le long de la route de 160 kilomètres afin d'éviter ou d'atténuer les dommages irréparables causés au fleuve et au milieu environnant, notamment à la navigation, ainsi qu'à la santé et au bien-être de la population riveraine.»

7. Il m'a donc été demandé d'examiner l'exactitude de ces déclarations, en gardant à l'esprit le contenu des conclusions du Nicaragua dans l'affaire relative à la *Route* (y compris dans le rapport du professeur Kondolf (ci-après le Rapport Kondolf de 2012, évoqué dans le paragraphe 9 ci-dessous), et en portant une attention particulière au risque de dommages irréversibles pour le fleuve San Juan.

8. Il m'a également été demandé d'examiner et de commenter les documents présentés à la Cour par le Nicaragua le 1<sup>er</sup> novembre 2013 à l'appui de sa demande. Ces documents sont les suivants :

- a) Confirmation des mesures d'urgence requises pour atténuer l'érosion et le dépôt de sédiments de la route 1856, Costa Rica, dans le fleuve San Juan, Nicaragua, rapport du professeur Kondolf, daté du 12 octobre 2013 [annexe 1 de la lettre HOL-EMB-223] ;
- b) Impacts continus de l'érosion provoquée par la route 1856, Costa Rica, sur le San Juan, Nicaragua, autre rapport du professeur Kondolf, daté du 30 octobre 2013 [annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223] ; et
- c) Photographies sélectionnées de caractéristiques de dépôts provoqués —le long du fleuve San Juan de Nicaragua— par la construction, la conception déficiente et l'absence de maintenance de la route 1856 par le Costa Rica, du fait d'erreurs de conception et de manque d'entretien]. Photographies prises entre le 20 et le 22 mai 2013 [appendice A], en complément de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223.

Mes principales observations sur ces documents sont présentées dans la partie 6 ci-dessous.

#### 4. MÉTHODOLOGIE

9. Dans ce rapport, je réunis et présente les résultats pertinents à ce jour issus des travaux de deux études scientifiques et techniques en cours que j'ai commandé en février 2013 et dont j'assume toujours la direction technique. Ces rapports sont les suivants : Rapport sur l'hydrologie et les sédiments des bassins costa-riciens déversant leurs eaux dans le fleuve San Juan, Institut Costaricien d'Electricité (ICE), Centre pour les études d'ingénierie, Département d'hydrologie, San Jose, Costa Rica (ci-après le Rapport de l'ICE), qui a été présenté comme annexe 1 ; et Rapport de surveillance systématique sur site de l'érosion et de l'apport solide le long de la route 1856, Université du Costa Rica, Faculté d'ingénierie, Ecole du génie civil (ci-après le Rapport de l'UCR), qui a été présenté comme annexe 2. Ces études ont été conduites pour fournir les données de départ nécessaires à mon examen du rapport établi par G. Mathias Kondolf intitulé «Environmental Impacts of Juan Rafael Mora Porras Route 1856, Costa Rica, on the Río San Juan, Nicaragua», décembre 2012 (le Rapport Kondolf de 2012), qui est l'annexe 1 du mémoire du Nicaragua dans l'affaire relative à la *Route*.

10. Je tire également parti de mes observations et connaissances acquises lors de recherches menées dans le cadre de la préparation d'un rapport qui accompagnera le contre-mémoire du Costa Rica dans l'affaire relative à la *Route* et qui a consisté à :

- a) participer à deux visites sur site (sur la route), les 15 et 16 février, et le 7 mai 2013. La première fois, j'ai parcouru en véhicule et/ou observé depuis les airs la route sur toute sa longueur. La deuxième fois, j'ai parcouru en voiture et observé depuis les airs les 41 premiers km de la route entre le marqueur II et Boca San Carlos. Lors des deux visites sur site, j'ai effectué des observations sur le terrain, parlé aux ingénieurs et aux scientifiques participant aux travaux d'atténuation et pris des photos au sol et depuis les airs ;
- b) commander, élaborer et superviser des études scientifiques et techniques conduites par des scientifiques et des ingénieurs costariciens qualifiés, afin de produire les données et les informations nécessaires à l'évaluation de l'impact potentiel de la construction de la route sur le fleuve San Juan ;
- c) organiser des réunions techniques avec l'équipe de scientifiques et d'ingénieurs qui se sont tenues les 14 et 17 février, les 6, 9 et 10 mai et les 30 et 31 juillet, au cours desquelles ont été discutées les approches et les méthodes à adopter dans l'exécution du travail, évalué l'avancement du projet, et analysés les résultats obtenus par l'exploration des archives, le travail de terrain, la télédétection, la recherche basée sur les SIG, et la modélisation informatique ; et enfin
- d) examiner et vérifier les conclusions préliminaires de l'équipe et demander des analyses complémentaires le cas échéant.

11. A chaque fois que je m'appuie sur des informations et des données issues des rapports de l'ICE ou de l'UCR, ou de tout autre rapport établi dans le cadre des enquêtes et des activités visées au paragraphe 10 ci-dessus, je le signale explicitement.

## **5. APPORT DE SÉDIMENTS EN PROVENANCE DE LA ROUTE DANS LE FLEUVE SAN JUAN**

### **5.1. Aperçu**

12. Selon moi, les estimations du Nicaragua quant à l'apport de sédiments en provenance de la route frontalière dans le fleuve San Juan ont été surestimés et même de manière excessive. Je considère qu'on ne peut pas dire que l'apport de sédiments depuis la route présente un risque de dommage significatif, et encore moins irréversible, pour le fleuve.

13. Mon avis s'appuie sur les résultats d'études scientifiques (rapportées en détail ci-dessous) qui indiquent que :

- a) il n'y a eu aucune augmentation mesurable de la charge sédimentaire du fleuve San Juan depuis la construction de la route (voir partie 5.2 ci-dessous) ;
- b) l'estimation du taux d'affaissement de la surface du terrain due à l'érosion des talus de déblayage et de remblayage le long de la Route faite dans le Rapport Kondolf 2012 (1 m par an) est une surestimation importante (voir partie 5.3 ci-dessous) ;
- c) l'apport de sédiments en provenance de la route, y compris les sédiments érodés par les mouvements de terrain, est loin d'être suffisant pour provoquer des dommages significatifs, et encore moins irréversibles, au fleuve San Juan (voir partie 5.4 ci-dessous), et
- d) même si l'estimation de l'apport supplémentaire de sédiments en provenance de la route donnée dans le Rapport Kondolf de 2012 était exacte (ce qui n'est pas le cas), il n'y aurait toujours pas d'impact sur la navigation dans le cours inférieur du fleuve San Juan suffisamment fort pour contraindre le Nicaragua à prendre des mesures particulières, comme le dragage (voir partie 5.5 ci-dessous).

14. Avant toute chose, il est important de garder à l'esprit que le fleuve San Juan draine un vaste bassin qui produit une quantité importante, bien que très variable, de sédiments chaque année, et de reconnaître que le fleuve est en mesure de traiter ces sédiments chaque année. Ceci est expliqué en détail dans le paragraphe 16 ci-dessous. Pour ces raisons, les comparaisons faites avec des cours d'eau tels que la rivière Clearwater aux Etats-Unis ne sont pas pertinentes<sup>1</sup>. En outre, compte tenu des caractéristiques propres au fleuve San Juan, les analogies avec des espèces de poissons telles que le saumon sont elles aussi inappropriées car les espèces de poisson vivant dans le fleuve San Juan sont naturellement adaptées à des concentrations élevées et variables de sédiments<sup>2</sup>.

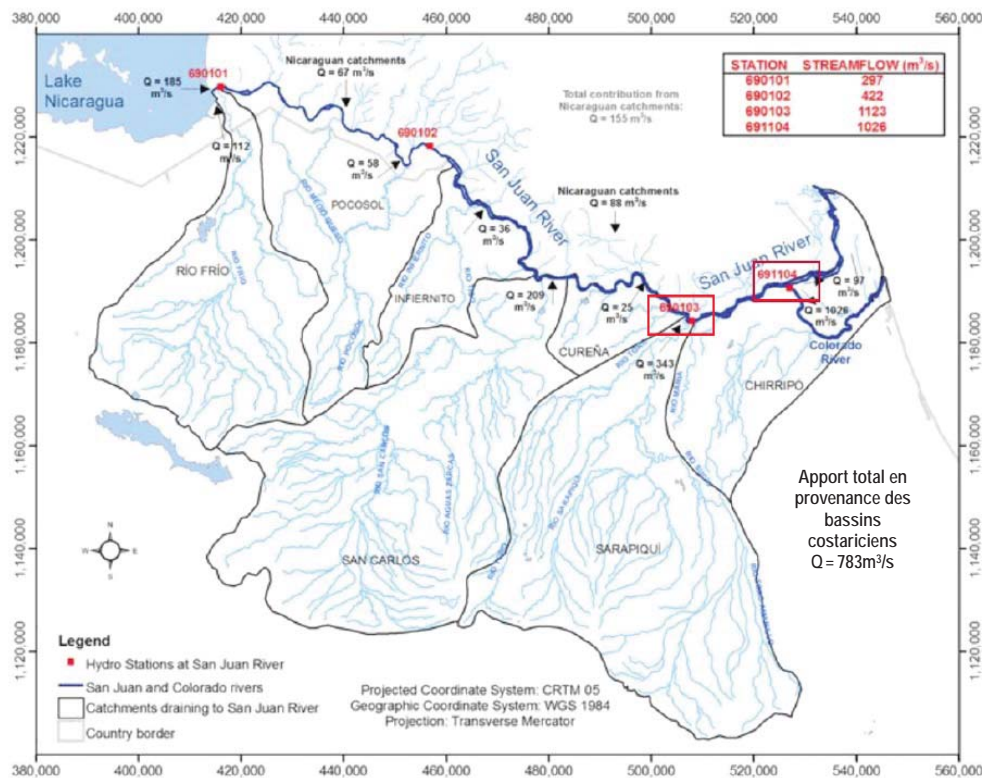
### **5.2. Existe-t-il des preuves d'une augmentation de la charge sédimentaire dans le fleuve San Juan depuis décembre 2010 ?**

15. Pour déterminer s'il existe des preuves à l'appui de l'affirmation du Nicaragua selon laquelle une forte augmentation de la charge sédimentaire du fleuve San Juan s'est produite depuis la construction de la route, j'ai examiné les mesures de Concentration de Sédiments en Suspension (CSS) déjà existantes faites dans le fleuve San Juan — Rio Colorado avant et après la construction de la route.

<sup>1</sup> Cf. annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, p. 8.

<sup>2</sup> Cf. annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, p. 2 et 8.

16. Le fleuve San Juan draine un vaste bassin (~ 40.000 km<sup>2</sup>) qui présente des zones de élevées, escarpées, et naturellement instables (dont des volcans en activité), et caractérisées par des précipitations abondantes, bien que très variables, inégalement réparties dans le bassin et au cours de l'année. De par ses caractéristiques physiques, le bassin charrie une lourde et très variable charge sédimentaire. Les mesures de CSS réalisées par la station 6901-03 de La Trinidad entre janvier 1974 et mars 1976<sup>3</sup> et par la station 6911-04 de Delta Colorado entre décembre 2010 et juin 2013, révèlent l'une comme l'autre la présence de concentrations de sédiments à la fois élevées et variables dans le fleuve. Ces mesures ont donc été faites avant et depuis la construction de la Route. Les CSS mesurées sur ces deux stations sont comparables car plus de 90 % du débit de sédiments qui passent par la station de La Trinidad transitent également par la station de Delta Colorado. Les emplacements des stations sont présentés dans la figure 1 ci-dessous et les données sont répertoriées dans le Tableau 1.



**Figure 1.** Stations hydrométriques et débits moyens annuels du fleuve San Juan - Système Colorado avec mise en exergue des stations de La Trinidad et de Delta Colorado (Rapport de l'ICE).

<sup>3</sup> J'ai utilisé ces données car c'était là les seules mesures de sédiments en suspension effectuées dans le fleuve San Juan avant la construction de la Route, à disposition de l'équipe technique. Ces mesures ont été réalisées conjointement par le Costa Rica et le Nicaragua ; on les trouve dans Governments of Nicaragua and Costa Rica (1977), *Central American Hydrological Project [PHCA], with the assistance of the United Nations Development Programme, San Juan River Hydroelectric and Navigation Project, December 1977, vol. 1*, p. 69 [Gouvernements du Nicaragua et du Costa Rica (1977), *Projet hydrologique d'Amérique centrale, avec le soutien du Programme de Développement des Nations Unies, Projet hydroélectrique et de navigation pour le fleuve San Juan, volume 1, page 69*]. Ces données ont été citées dans le contre-mémoire du Nicaragua dans le cadre de l'affaire des droits de navigation, «la charge sédimentaire en aval de la rivière Sarapiquí, mesurée au début des années soixante-dix était de 10,2 millions de tonnes métriques par an. Voir contre-mémoire du Nicaragua, Navigational Rights Case [affaire du *Différend relatif à des droits de navigation et des droits connexes (Costa Rica c. Nicaragua)*], par. 1.1.8.

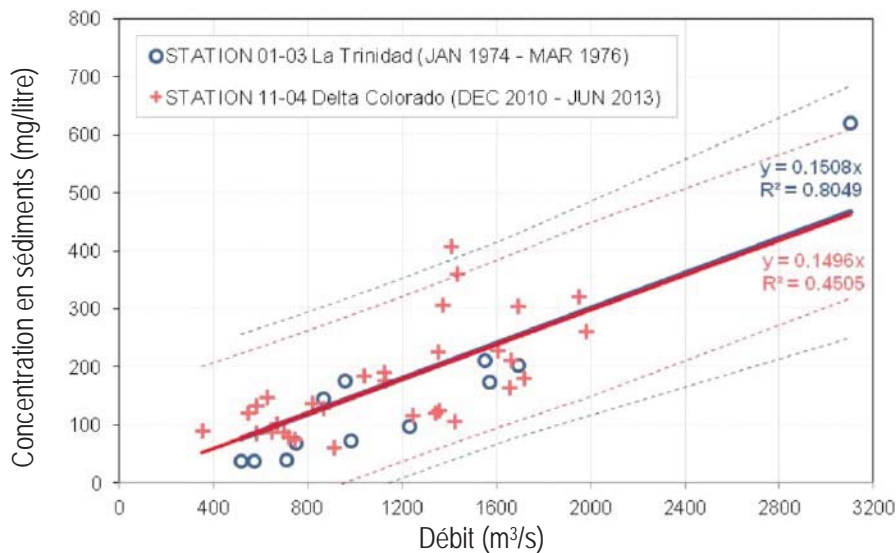


**Tableau 1.** Valeurs de sédiments en suspension pour le fleuve San Juan (extrait du rapport de l'ICE)

Code Station	Nom	Bassin	Fleuve	Nb d'échantillons	Période d'échant.	Charge en suspension moyenne annuelle (t an <sup>1</sup> )
01-03	La Trinidad	San Juan	San Juan	12	1974-1976	7 995 000
11-04	Delta Colorado	San Juan	Colorado	31	2010-2013	5 981 000 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Note : Il s'agit de la charge en suspension moyenne annuelle dans le fleuve Colorado en aval du delta.

17. Afin de les comparer, ces données sont représentées sur un même graphique, complétées par les courbes d'étalonnage de CSS établies par régression et en fonction du débit de chaque station et de chaque période (Figure 2).



**Figure 2.** Mesures de concentration de sédiments en suspension, courbes d'étalonnage et intervalles de confiance de 95 % pour les données de la période pré-Route 1856 [La Trinidad (01-03), de janvier 1974 à mars 1976] et de la période post-Route 1856 [Delta Colorado (11-04), de décembre 2010 à juin 2013]. Les lignes continues correspondent aux courbes d'étalonnage des CSS (basées sur la régression la mieux adaptée). Les lignes en pointillés indiquent les intervalles de confiance de 95% pour chaque courbe de régression (extrait du Rapport de l'ICE).

18. Si les sédiments supplémentaires en provenance de la route avaient causé une forte augmentation du taux de transport de sédiments dans le fleuve San Juan, cela se manifesterait dans la figure 2 par des mesures de CSS plus élevées depuis 2010 et par une variation à la hausse de la courbe d'étalonnage des sédiments en suspension de 2010-2013 par rapport à celle de 1974-1976. Or, il ressort clairement de la figure 2 que tel n'est pas le cas.

19. Au contraire, la concentration la plus élevée (CSS > 600 mg par litre) a effectivement été observée au cours de la période antérieure à la construction de la Route, et la distribution de 27 des 31 concentrations post-Route de la figure 2 coïncide avec celle des données pré-Route. Il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les courbes d'étalonnage de sédiments en suspension pré- et post-Route : la figure 2 montre qu'elles sont pratiquement identiques. Autrement dit, toutes les différences entre les CSS pré- et post-Route mesurées dans ces stations sont le fruit du hasard.

20. En outre, le haut degré de variabilité naturelle dans le rapport entre débit et concentration de sédiments en suspension signifie qu'un écart important sépare les intervalles de confiance à 95 % sur les courbes d'étalonnage. Non seulement la variabilité naturelle reste similaire dans les périodes pré- et post-Route, mais encore les deux fourchettes d'incertitude, elles aussi, coïncident presque entièrement. Cela montre que la variabilité des CSS mesurées n'a pas changé de façon significative entre les périodes pré- et post-Route, et que les différences observées entre les valeurs mesurées sont probablement dues au hasard.

21. Dans la mesure où le débit est mesuré de façon intermittente sur ces stations hydrométriques, la courbe d'étalonnage des sédiments en suspension peut être intégrée aux données de débit pour calculer la charge annuelle moyenne de sédiments en suspension. Cette méthode a donc été utilisée pour calculer les charges annuelles moyennes de sédiments en suspension charriées par le fleuve San Juan à La Trinidad entre 1974 et 1976 : 7 995 000 t par an ; et par le Rio Colorado à Colorado Delta entre 2010 et 2013 : 5 981 000 t par an (tel que mentionné dans le tableau 1).

22. Les débits moyens mesurés dans les stations de La Trinidad et de Delta Colorado mentionnés dans le tableau 2 sont respectivement de 1123 m<sup>3</sup> par seconde et 1026 m<sup>3</sup> par seconde. Ces mesures suggèrent qu'en moyenne, ~ 91 % du débit du fleuve San Juan à l'approche de Delta Costa Rica s'écoule dans le Rio Colorado, tandis que ~ 9% s'écoule dans le cours inférieur du fleuve San Juan. Dans la mesure où la charge en suspension est intégralement distribuée par l'écoulement du fleuve, on peut raisonnablement penser que la charge de sédiments en suspension se répartie selon le même rapport.

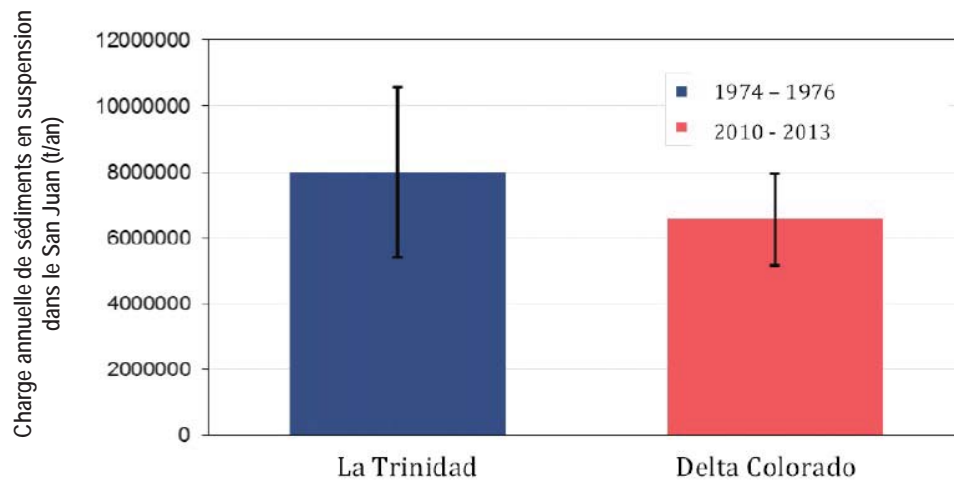
23. Sur cette base, la charge en suspension mesurée dans le Rio Colorado à la station de Colorado Delta peut être ajustée pour obtenir celle du fleuve San Juan en amont du Delta en la multipliant par le réciproque 0,91. Avec cet ajustement, la charge annuelle moyenne en suspension dans le fleuve San Juan entre décembre 2010 et juin 2013 est donc d'environ 6 573 000 t par an. Il s'ensuit que la moyenne annuelle de la charge en suspension dans le cours inférieur du fleuve San Juan sur cette période est d'environ 592 000 t par an.

24. Cependant, en considérant ces chiffres, il convient cependant de garder à l'esprit qu'ils ont été obtenus à partir d'un petit nombre d'échantillons prélevés sur de courtes périodes d'observation (deux à trois ans). Les intervalles de confiance à 95 % des relations de régression utilisés pour générer les courbes d'étalonnage des sédiments en suspension reflètent non seulement l'incertitude due à la faible quantité de points de données, mais également au haut degré de variabilité naturelle inhérent à la façon dont les CSS varient en fonction du débit du fleuve San Juan.

25. Partant de ce constat, des analyses d'incertitude ont été réalisées sur les données issues des deux stations pour produire des intervalles de confiance à 95 % pour le calcul de la moyenne annuelle des charges sédimentaires dans le fleuve San Juan. Les résultats sont présentés dans le tableau 2 et illustrés par la figure 3.

**Tableau 2.** Charge moyenne annuelle des sédiments en suspension dans le fleuve San Juan-Colorado (extrait du rapport de l'ICE)

Fleuve	Période	Charge moyenne annuelle de sédiments en suspension (t par an)	
		Meilleure estimation	Intervalle de confiance à 95 %
San Juan	1974-1976	7 995 000	5 405 000 – 10 585 000
San Juan	2010-2013	6 573 000	5 181 000 – 7 966 000
Colorado	2010-2013	5 981 000	--
San Juan inférieur	2010-2013	592 000	--



**Figure 3.** Charge annuelle moyenne de sédiments en suspension dans le fleuve San Juan, sur la base des mesures effectuées aux stations de La Trinidad (1974-1976) et Delta Colorado (2010-2013). Les lignes verticales noires indiquent des intervalles de confiance de 95 %. Observez que les charges tirées des mesures à la station de Delta Colorado ont été ajustées pour représenter le fleuve San Juan, en tenant compte du fait que la charge en suspension du delta se répartit dans les mêmes proportions que le débit (tiré du rapport de l'ICE)

26. En comparant les charges de sédiments en suspension transportées annuellement par le fleuve au cours des deux périodes d'observation, la première chose à signaler est que la meilleure estimation de la moyenne pour la période 2010-2013 est nettement *inférieure* à celle de 1974-1976. Mais cela n'a rien d'étonnant car la période post-Route a été plus sèche que d'habitude. Par exemple, les données relevées par la station hydrométrique El Bum (69-578) indiquent que les précipitations annuelles moyennes de l'année hydrologique 1975-1976 sont de 3 651 mm, contre seulement 2267 mm au cours de l'année hydrologique 2011-2012. Une pluviométrie plus basse fait diminuer le ruissellement du bassin versant, réduisant l'érosion et donc la charge en suspension.

27. Cependant, il est intéressant de constater que la différence entre les charges annuelles moyennes en suspension tombe dans les intervalles de confiance de ces dernières (présentées dans le tableau 2). Comme le montre le chevauchement des intervalles de confiance de la figure 3, les niveaux élevés d'incertitude et la variabilité naturelle des charges annuelles de sédiments en suspension signifient qu'il n'y a pas de différence statistiquement significative entre les charges de sédiments en suspension annuelles moyennes avant et après la construction de la Route.

28. Le fait est que, s'il existe bien des différences entre les charges calculées, l'analyse des données montre qu'elles ne sont pas *significatives*. Statistiquement, il y a 95 % de chances que les deux moyennes des échantillons proviennent de la même population annuelle de charges de sédiments en suspension, une population caractérisée par un très haut degré de variabilité d'une année à l'autre. Il faut donc en conclure que la différence entre les deux n'est pas statistiquement significative.

29. Les données révèlent que l'incertitude de mesure, ainsi que les fluctuations naturelles des précipitations, des débits, des apports de sédiments des bassins versants et de CSS font que les charges de sédiments en suspension sont susceptibles de varier d'une année sur l'autre de 5 à 10,5 millions de tonnes. Avec des mesures plus nombreuses et réalisées sur une période plus longue, l'intervalle de confiance de la charge en suspension annuelle moyenne s'en serait probablement trouvé quelque peu réduit, mais la fourchette des charges possibles serait restée large car la forte variabilité naturelle est une propriété du fleuve et non des données.

30. Cette observation est importante car elle démontre qu'il n'est pas possible de recourir à des mesures de charges pour prouver la réalité d'une forte augmentation des sédiments charriés dans le fleuve San Juan, à moins que l'augmentation annuelle en question soit tout à fait exceptionnelle — autrement dit qu'elle soit supérieur à un seuil d'environ 10,5 millions de tonnes.

### **5.3. L'estimation à 1 m par an du taux d'affaissement de la surface du terrain donnée dans le Rapport Kondolf de 2012 est-elle raisonnable ?**

31. Dans le Rapport Kondolf de 2012, le professeur Kondolf conclut que «le glissement de terrain / l'érosion du ravin est de 1 mètre de profondeur en moyenne (c'est à dire le terrain s'est affaissé de 1 mètre en moyenne» (Rapport Kondolf de 2012, page 46). Le professeur Kondolf déduit de cette estimation un apport de sédiments de 87000 à 109 000 m<sup>3</sup> par an (Rapport Kondolf de 2012, page 46). Cette estimation est également citée dans l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223 (p. 2). Il s'agit d'une estimation de tous les sédiments apportés dans le fleuve par les pentes et autres zones perturbées le long de la route, que ce soit sous l'effet de mouvements de masse ou de ravinements. Dans le Rapport Kondolf de 2012, l'érosion de la plateforme de la route est écartée comme étant inférieure à 10 % de celle des pentes, et dans l'annexe 1 de la lettre HOL-EMB-223, le professeur Kondolf note que l'essentiel de la plateforme de la route est désormais revêtu de gravier, ce qui doit avoir pour effet de réduire encore un peu plus l'érosion de la route elle-même, en particulier l'érosion des talus de déblayage et de remblayage.

32. Pour déterminer si la vitesse à laquelle la surface du terrain s'affaisse sous l'effet de l'érosion des talus de déblayage et de remblayage et d'autres zones perturbées le long de la route donnée dans le Rapport Kondolf de 2012 (1 m par an) (à la page 46 du Rapport Kondolf de 2012) est crédible, ou même raisonnable, une équipe de l'Université du Costa Rica surveille l'érosion, depuis le 8 juin 2013, sur neuf des sites où elle est la plus active sous forme de nappe, de rigoles (micro-canaux), de glissements de terrain et de ravinement le long de la route entre le marqueur II et le Río Infiernito Figure 4.



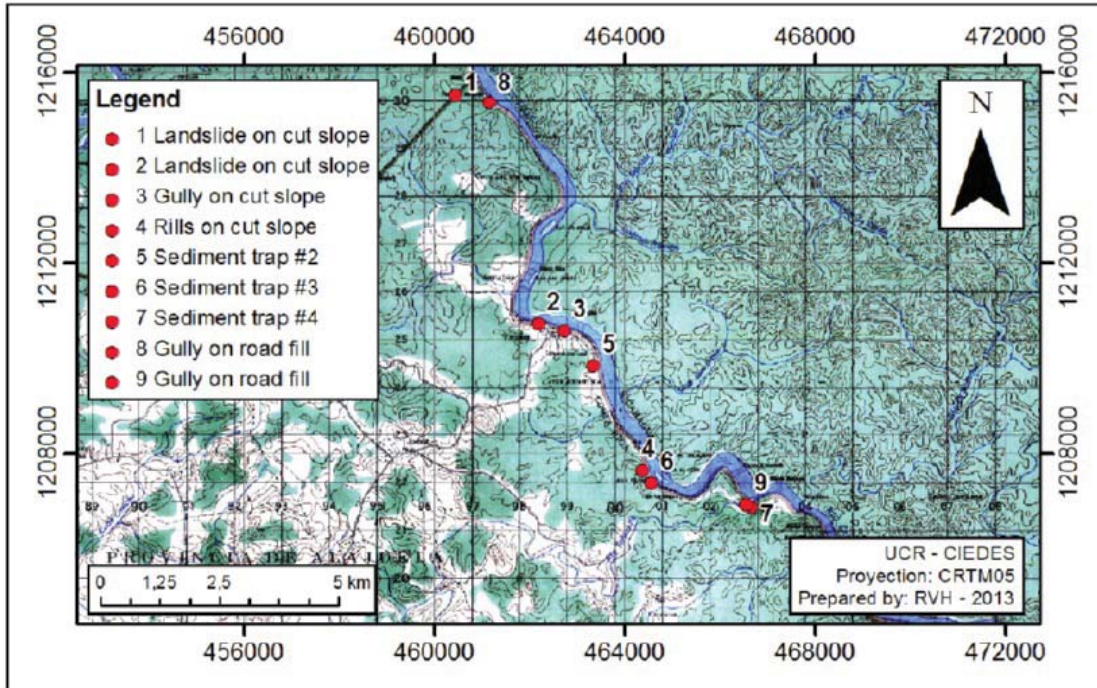


Figure 4. Emplacement des sites surveillés (tiré du rapport de l'UCR).

33. Les résultats de la surveillance présentés ici sont issus des deux principaux glissements rotationnels le long de la Route ; des trois grandes ravines ; du talus qui présentait l'érosion en rigoles (micro-canaux) la plus intense ; et d'un piège à sédiments qui recueille les sédiments érodés d'un tronçon escarpé de la plateforme de la route et d'un talus de déblayage soumis à une érosion en nappe (figures 5 et 6). Ainsi, on peut raisonnablement penser que les taux d'affaissement de la surface du terrain enregistrés correspondent à ceux du «pire scénario» érosif lié à la route à ce jour.

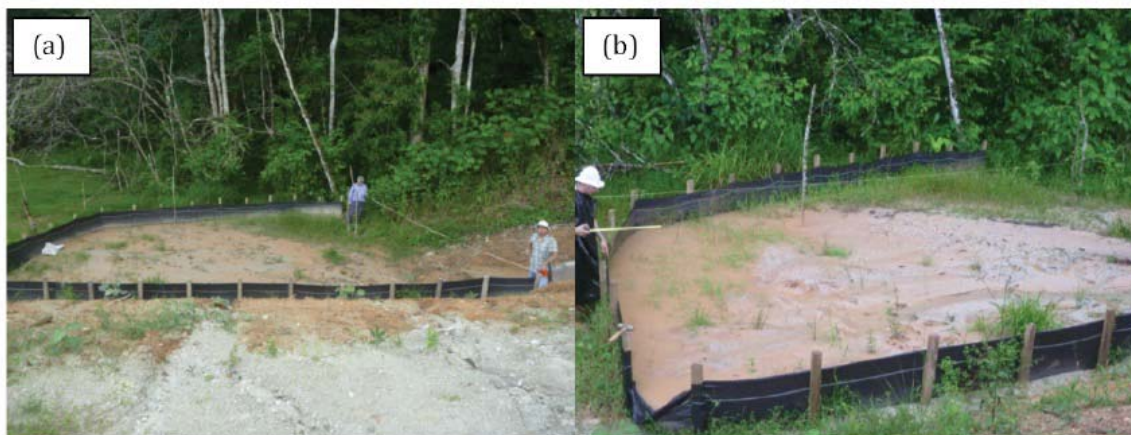


Figure 5. Piège à sédiments n°2 (a) le 8 juin et (b) le 22 juillet 2013 (extrait du rapport de l'UCR).





**Figure 6.** Site de surveillance de l'érosion en rigoles sur un talus de déblayage, avec rigoles numérotées et superposition d'une grille.

34. D'après les relevés effectués sur le terrain, le taux d'affaissement de la surface imputable à l'érosion de la plateforme de la route et des talus de déblayage varie entre 0,061 et 0,095 m par an environ. Cet écart est dû à des différences dans la quantité de terre perdue entre les différents relevés effectués au cours de périodes relativement sèches (juin - juillet) et relativement humide (juillet - août) en 2013. Sur la base de ces mesures directes, nous pouvons conclure que la valeur de 0,095 m par an pour exprimer le taux annuel moyen d'affaissement de la surface du terrain sous l'effet de l'érosion en nappe est prudente.

35. Sur les talus de déblayages surveillés où des glissements de terrain ont été observés, des derniers représentaient 10 à 13 % de la superficie totale de la pente et ont provoqué un affaissement de la surface du terrain de 0,11 à 0,38 mètre. On peut donc raisonnablement penser que les pentes se sont formées lorsque la Route était en construction en 2011, auquel cas elles existent maintenant depuis au moins deux ans. On en déduit donc des taux moyens d'affaissement de la surface provoqués par des glissements de terrain de 0,06 à 0,19 m par an sur la totalité des surfaces des pentes touchées.

36. Les ravines sur talus de déblayage constituent le type d'érosion le plus rarement observé par l'UCR le long de la Route entre le marqueur II et le Río Infiernito, tandis que les rigoles sont la forme la plus répandue. La plus grande ravine observée dans l'étude avait une profondeur maximale de 3 mètres et une surface de 13,1 m<sup>2</sup>, ce qui signifie qu'elle couvrait à peine plus de 2 % du talus sur elle s'était formée. Le volume total de sol érodé pour donner naissance à cette ravine était d'environ 6 m<sup>3</sup>. En rapportant ce volume à la superficie totale du talus, l'affaissement de terrain moyen imputable à l'érosion provoquée par cette ravine est de 0,01 m. S'il l'on suppose que le talus s'est formé lorsque la route était en construction en 2011, alors le taux d'affaissement du terrain imputable au ravinement est de 0,005 m par an en moyenne sur toute la surface du talus affecté.

37. La majorité des talus le long de la route entre le marqueur II et le Río Infiernito subissent une érosion en rigoles. Sur le site d'étude des rigoles, on comptait 26 rigoles, dont les plus grandes présentaient une largeur maximale de 0,3 mètre et une profondeur maximale de 0,6 mètre. Sur la base de l'analyse spatiale de toutes les rigoles de la zone prise pour échantillon, et en partant du postulat prudent selon lequel elles présentaient *toutes* une largeur et une profondeur égales à celles des plus grandes d'entre elles, l'UCR a conclu que l'érosion en rigoles avait abaissé la surface du terrain de la pente de 0,12 mètres en moyenne. Toujours en postulant que la pente se soit formée pendant la construction de la Route en 2011, on déduit un taux moyen d'affaissement de la surface du sol imputable au ruissellement de 0,06 m par an environ sur la totalité de la pente. Dans la mesure où le site choisi par l'UCR pour conduire son étude était celui dont les pentes présentaient le plus grand nombre de rigoles, on considère que ces résultats correspondent au «pire scénario» d'érosion en rigoles de toute la zone étudiée.

38. Les talus de remblayage de la zone en question ne présentent pas d'érosion imputable à d'importants glissements de terrain, car les mouvements de masse provoquent des effondrements de terre superficiels beaucoup moins dommageables. Une érosion en rigoles est observée sur les talus de remblayage, et le taux observé sur les talus de déblayage présentant le plus de rigoles peut être raisonnablement appliqué à l'érosion en rigoles des talus de remblayage.

39. L'UCR a observé que l'érosion en ravines des talus de remblayage couvrait environ 4 à 10 % des remblais surveillés, et qu'elle était responsable de 0,06 à 0,10 m d'affaissement de la surface de ces talus en moyenne sur toute la surface du talus de remblayage affecté. Contrairement à l'érosion des talus de déblayage de la route, les ravines surveillées avaient mis environ six mois à se former. Par conséquent, on peut estimer que le taux annuel moyen d'affaissement de la surface du terrain imputable à l'érosion de ravinement des talus de remblayage est supérieur à celui des talus de déblayage, se situant entre 0,12 et 0,20 m par an.

40. Le tableau 3 ci-dessous synthétise les profondeurs d'érosion moyennes observées et les taux annuels moyens d'affaissement de la surface du terrain mentionnés ci-dessus. Dans la mesure où cette synthèse présente les valeurs les plus élevées de la surface érodée/surface de l'élément physique, la profondeur d'érosion moyenne, et les taux annuels moyens d'affaissement de la surface du terrain pour chaque type d'érosion, les données en question peuvent surestimer les valeurs moyennes réelles pour la Route entre le marqueur II et le Río Infiernito ; ce qui les rend prudentes.

**Tableau 3.** Synthèse des résultats de la surveillance de l'érosion (extraits du Rapport de l'UCR).

Élément physique concerné	Type d'érosion	Surface érodée/Surface de l'élément (%)	Profondeur moyenne de l'érosion (m)	Taux moyen d'affaissement de la surface du terrain (m/an)
Talus de déblayage	Glissement de terrain	13	0,38	0,19
Talus de déblayage	Ravine	2	0,01	0,005
Talus de déblayage*	Rigole	50	0,12	0,06
Plateforme de la route et talus de déblayage	Nappe	100	0,02	0,095
Talus de remblayage	Ravine	9	0,10	0,20

\* Ces résultats s'appliquent également aux rigoles sur les talus.

41. Afin de garantir encore un peu plus la pertinence des données dans le calcul de l'érosion liée à la Route et de l'apport potentiel de sédiments au fleuve San Juan, l'UCR recommande en outre d'utiliser les profondeurs moyennes d'érosion par glissements de terrain, ravines et rigoles sur talus de déblayage à la place des taux annuels estimés d'affaissement de la surface de terrain. Pour l'érosion en nappe, c'est le taux maximum observé (0,095 m par an pendant la saison des pluies) qui est recommandé. Enfin, l'UCR considère que le taux 0,20 m par an est la valeur la plus prudente pour les ravines des talus de la route. Ces taux surestiment tous probablement l'érosion moyenne réelle atteinte à ce jour, mais étant donné que les deux dernières années ont été plus sèches que d'habitude, ils pourraient être plus élevés encore à l'avenir. Ce ne sera le cas que si les risques d'érosion ne sont pas réduits d'ici là, et que les pentes sont laissées à la merci d'éventuelles précipitations plus importantes. Comme nous le verrons dans la partie 7 ci-dessous et dans les annexes 3 et 6, les travaux d'atténuation des risques d'érosion ont déjà commencé et vont se poursuivre tant qu'ils seront nécessaires.

42. Dans le Rapport Kondolf de 2012, les taux d'affaissement de la surface du terrain imputables à l'érosion ont été estimés à partir d'observations visuelles lointaines de la route, depuis les airs ou par bateau, au cours d'une seule visite de deux jours faite dans la région en octobre 2012, et par confrontation avec des études déjà existantes dressant des bilans sédimentaires dans le Nord-Ouest Pacifique de l'Amérique du Nord, et à partir des impacts érosifs liés à la route en d'autres endroits observés par l'équipe (Rapport Kondolf de 2012, page 46). Dans son rapport, le professeur Kondolf déclare : « nous avons estimé de façon prudente que le glissement de terrain et l'érosion en ravines se produisent sur 40-50 % des surfaces perturbées et escarpées (de 21,8 à 27,3 ha) et que ce glissement de terrain/érosion en ravines est d'environ 1 m de profondeur (c.-à-d. qu'il y a affaissement de la surface du terrain d'un mètre en moyenne) » (Rapport Kondolf de 2012, page 46).

43. La surveillance des glissements de terrain et de l'érosion en ravines rapportée par l'UCR ci-dessus suggère que le taux d'affaissement de la surface du terrain estimé dans le Rapport Kondolf de 2012 est probablement cinq fois trop élevé. En outre, la surveillance sur le terrain menée par l'UCR indique que les glissements de terrain et des ravines concernent en moyenne 10 à 15 % des talus présentant ces caractéristiques, si bien que l'estimation de 40 à 50 % de la surface de la route touchée par cette érosion mentionnée dans le Rapport Kondolf de 2012 semble également nettement trop élevée.

44. Au regard de mes propres travaux, dont les inspections de la route menées en février et mai 2013, cette moyenne de 1 m par an d'affaissement de la surface du terrain dû aux glissements de terrain et aux ravines est trop élevée et probablement inexacte. En outre, l'hypothèse selon laquelle les glissements de terrain et les ravines couvrent 40 à 50 % des talus et autres zones perturbées repose sur une surestimation de la surface de ces éléments physiques. À l'inverse, les taux et les surfaces affectées surveillés et présentés dans le tableau 3 sont tout à fait raisonnables et, à mon avis, plus fiables.

45. Partant, l'apport annuel moyen de sédiments imputable aux glissements de terrain et à l'érosion en ravines entre le marqueur II et Boca San Carlos (c'est-à-dire sur les 41,6 kilomètres en amont de la route qui longe le fleuve) estimé par le professeur Kondolf (mentionné à la page 46 du Rapport Kondolf de 2012) entre 218 400 à 273 000 m<sup>3</sup> par an est probablement excessif.

46. Dans l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, que j'aborde dans la partie 6 ci-dessous, le professeur Kondolf met l'accent sur l'impact des «mouvements de masse» qu'il décrit comme «le déplacement de volumes plus importants de terre par l'effet de la gravité, souvent le long de plans de faille générés par des différences de matériaux, comme c'est le cas de la ligne de séparation entre un volume de matériau de remblai et la pente sur laquelle il a été placé» (*ibid.*, p. 9). Je suis d'accord en principe avec cette description. Dans le cadre de son inspection en octobre 2013, le professeur Kondolf indique également que «l'existence locale de mouvements de masse de talus de déblayage et de remblayage significatifs [sic] est manifeste» (*ibid.*, p. 14). Cependant, le «mouvement de masse» que le professeur Kondolf dit avoir observé en octobre 2013 ne l'a pas conduit à revoir ses estimations d'apports de sédiments en provenance de la route, qui, comme indiqué dans le paragraphe 31 ci-dessus, englobent tous les apports de sédiments, qu'ils soient issus de mouvements de masse ou autre.

47. Toutes les formes de mouvements de masse (y compris les glissements de terrain) sont déclenchées par la gravité. En clair, le poids du talus devient plus important que sa force de résistance, et il s'effondre. La rupture peut être provoquée par l'un des mécanismes de déclenchement de glissement de terrain énumérés dans le rapport de l'UCR, à la page 14. Il existe donc tout un ensemble de mécanismes par lesquels les talus cèdent sous l'effet des mouvements de masse, les plus importants étant les glissements de terrain et les plus restreints les glissements superficiels. Dans les études de l'UCR et de l'ICE dans lesquelles j'ai trouvé les estimations d'apport de sédiments décrites dans le tableau 3 ci-dessus, il est considéré que tout mouvement de masse est provoqué par des glissements de terrain. En conséquence, les apports de sédiments estimés sont crédibles car, de tous les phénomènes potentiels qui conduisent à un mouvement de masse, le glissement de terrain est celui dont l'ampleur est la plus grande. En outre, il est clair que ces estimations tiennent compte de tous les apports de sédiments potentiels au fleuve en provenance de la route, y compris ceux provoqués par des mouvements de masse. Les dommages que cet apport de sédiments pourrait causer au fleuve San Juan sont abordés dans la partie 5.4 ci-dessous.

#### **5.4. Les taux de dépôt calculés pour les sédiments issus de l'érosion de la route, tirés des résultats du suivi sur le terrain, sont-ils suffisants pour produire des dommages «significatifs» ou «irréversibles» au fleuve San Juan?**

48. Pour déterminer si les sédiments produits par l'érosion de la route sont susceptibles de constituer un risque pour le fleuve San Juan, le rapport de l'ICE a repris les résultats du suivi de l'érosion relevés dans le rapport de l'UCR, afin d'estimer les taux de dépôt de sédiments charriés de la route vers le fleuve. Ce travail a été réalisé en deux étapes. Premièrement, les données du tableau 3 ont été adoptées pour représenter les taux annuels moyens d'affaissement de la surface du sol, comme le recommandait le rapport de l'UCR. L'ICE a ensuite utilisé la longueur et la pente de la route, ainsi que les talus de remblayage et de déblayage et d'autres zones bouleversées sur la totalité de la longueur de la route adjacente au fleuve entre le marqueur 2 et Delta Costa Rica pour convertir les taux moyens annuels d'affaissement de terre en volumes annuels de terres érodées.

49. Les résultats ont été résumés pour chacun des cinq principaux bassins hydrographiques s'écoulant du Costa Rica au fleuve Río San entre le marqueur 2 et Delta Costa Rica, dans le tableau 4.

**Tableau 4.** Estimation des taux d'érosion moyens annuels de la route (d'après le rapport de l'ICE).

Bassin	Longueur (km)	Taux annuel par volume (m <sup>3</sup> /an)			Taux annuel par masse* (t/an)		
		Route	Talus	Total	Route	Talus	Total
Principaux bassins costariciens se jetant directement dans le San Juan entre le marqueur 2 et Delta CR							
Infiernito	35	12 260	28 000	40 260	20 450	46 750	67 250
San Carlos	11	2 060	600	2 660	3 450	1000	4 450
Cureña	28	5 220	7 560	12 780	8 700	12 650	21 350
Sarapiquí	3	560	160	720	950	250	1 200
Chirripó	22	4 100	260	4 360	6 850	450	7 300
Bassin costaricien se jetant directement dans le San Juan entre le marqueur 2 et Delta Colorado							
Total	120	24200	35580	30780	40400	61100	101550

\* Pour convertir les volumes érodés en masses, une densité brute de 1,67 t m<sup>-3</sup> a été retenue. Valeur habituelle pour représenter la densité brute des limons et des sols.

50. Deuxièmement, l'ICE a appliqué un ratio de dépôt sédimentaire pour estimer la proportion de sédiments érodés atteignant le fleuve San Juan. Le rapport Kondolf de 2012 a estimé ce ratio à 0,4 (Rapport Kondolf de 2012, page 46). Néanmoins, si l'on considère la taille modeste de nombreux micro-bassins se jetant soit directement dans le fleuve San Juan soit dans les cinq principaux affluents du Costa Rica, et compte tenu de la relative finesse des grains des sédiments érodés (essentiellement des limons, si l'on en croit le rapport de l'UCR), l'ICE en a conclu que l'estimation du Dr Kondolf était probablement faible et une estimation supérieure de 0,6 a été retenue.

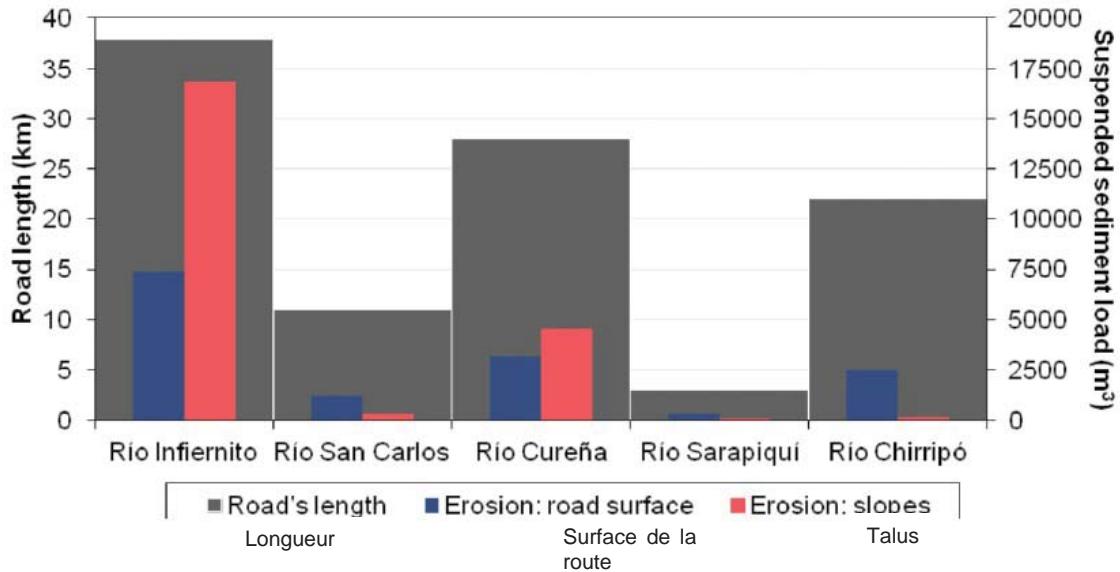
51. Je suis d'accord avec le choix de l'ICE d'un ratio de 0,6 comme valeur raisonnable, mais plus prudente que l'hypothèse de 0,4 d du Dr Kondolf. Les résultats de l'application de ce ratio plus élevé sont présentés dans le tableau 5 et repris dans la Figure 7.

**Tableau 5.** Apports moyens annuels de sédiments issus de l'érosion de la route au fleuve San Juan.

Bassin	Longueur (km)	Taux annuel par volume (m <sup>3</sup> /an)			Taux annuel par masse* (t/an)		
		Route	Talus	Total	Route	Talus	Total
Principaux bassins costariciens se jetant directement dans le San Juan							
Infiernito	38	7 360	16 800	24 160	12 250	28 050	40 300
San Carlos	11	1 240	360	1 600	2 050	600	2 650
Cureña	28	3 140	4 540	7 680	5 200	7 600	12 800
Sarapiquí	3	340	100	440	550	150	700
Chirripó	22	2 460	160	2 620	4 100	250	4 350
Bassins costariciens se jetant directement dans le San Juan entre le marqueur 2 et Delta Colorado							
Total	120	14 540	21960	36 500	24 150	36 650	60 800

\* Pour convertir les volumes érodés en masses, une densité brute de 1,67 t m<sup>-3</sup> a été retenue. Valeur habituelle pour représenter la densité brute des limons et des sols.





**Figure 7.** Estimation des apports annuels de sédiments issus de l'érosion de la route au fleuve San Juan, à partir des cinq bassins entre le marqueur 2 et Delta Colorado (d'après le rapport de l'ICE).

52. Les résultats indiquent que le dépôt de sédiments provenant de l'érosion des talus de la Route vers les bassins de San Carlos, Sarapiquí et Chirripo du fleuve San Juan est négligeable. Les apports de sédiments issus des talus dans le bassin Infiernito de la route posent davantage de problèmes, comme le confirme la décision du Dr Kondolf de concentrer son attention sur ce segment dans son rapport de 2012.

53. Néanmoins, l'apport moyen annuel estimé de sédiments issus de l'érosion du segment Infiernito s'élève à environ 24 000 m<sup>3</sup> par an, ce qui est inférieur à l'estimation du Dr Kondolf pour les premiers 41,6 kilomètres de route compris entre le marqueur 2 et Boca San Carlos (87 000-109 000 m<sup>3</sup> par an). De fait, l'apport estimé pour l'ensemble de la route suivant le fleuve entre le marqueur 2 et Delta Costa Rica (36 500 m<sup>3</sup> par an) est compris entre un tiers et la moitié de l'estimation observée à la page 46 du rapport Kondolf de 2012.

54. Les taux moyens annuels de dépôts sédimentaires supplémentaires indiqués dans le Tableau 5 et représentés dans la Figure 7 dressent l'état des lieux entre décembre 2010 et juin 2013. Selon les résultats, durant cette période, des sédiments supplémentaires ont été arrachés de la route pour rejoindre le fleuve San Juan et l'Infiernito et dans une moindre mesure le Cureña, mais à des taux insuffisants pour avoir un quelconque impact sur le fleuve ou son environnement immédiat. Cela est dû à la relative grande taille et à la puissance du fleuve San Juan et à sa capacité inhérente à absorber et charrier des sédiments supplémentaires sans perturber la morphologie de son canal (modulé par la géologie) et ses habitats et écosystèmes aquatiques et riverains (qui sont bien adaptés à des charges sédimentaires élevées et variables).

## **5.5. Capacité des sédiments issus de l'érosion de la route à avoir un impact sur le fleuve San Juan**

### **5.5.1. Introduction**

55. L'objet de la présente partie est d'examiner si un apport supplémentaire de sédiments provenant de l'érosion de la route au fleuve San Juan pourrait causer des «dommages irréversibles actuellement infléchi [sic] au fleuve et à son environnement, y compris à la navigation, à la santé et au bien-être de la population vivant le long des berges» et si «les travaux de voirie du Costa Rica ont provoqué une augmentation de la charge sédimentaire du fleuve San Juan obligeant le Nicaragua à engager un certain nombre d'actions telles que le dragage afin de préserver la capacité et la quantité des eaux du fleuve». De fait, les données ne corroborent aucune de ces deux affirmations.

### **5.5.2. Charge annuelle estimée des sédiments issus de l'érosion de la route alimentant le fleuve San Juan**

56. D'après les données et les calculs présentés dans le rapport Kondolf 2012 (page 46), la quantité totale moyenne de sédiments apportée au fleuve San Juan par la route varie chaque année de 87 000 à 109 000 m<sup>3</sup>. Comme nous l'avons expliqué au point 31 ci-dessus, cette estimation englobe toutes les sources potentielles d'apport de sédiments considérées comme significatives dans le rapport Kondolf de 2012 (une constatation qui est réexaminée à l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223), notamment l'érosion de surface et les mouvements de masse.

57. L'estimation du Dr Kondolf repose sur un déplacement sur le terrain de trois jours effectué en octobre 2012, au cours duquel il a observé la route à partir d'un hélicoptère et d'un navire sur le fleuve San Juan, sans jamais effectuer de mesure de l'érosion ni du dépôt sédimentaire. Il convient d'observer que le chiffre avancé par le Dr Kondolf vaut uniquement pour les 41,6 premiers kilomètres de la route entre le marqueur 2 et Boca San Carlos. Il n'a effectué aucune estimation de l'érosion pour les 60 autres kilomètres entre Boca San Carlos et Delta Costa Rica, ni n'a laissé entendre que son estimation pour les 41,6 premiers kilomètres pourrait être revue à la hausse pour s'appliquer à la totalité du tronçon entre le marqueur 2 et Delta Costa Rica. De mon point de vue, revoir cette estimation à la hausse serait déraisonnable car comme l'a observé le Dr Kondolf, 43 des 54 sites sur lesquels il aurait observé l'apport de sédiments en provenance de la route au fleuve San Juan se trouvent dans les 41,6 premiers kilomètres, les 11 autres sites se trouvant le long du tronçon restant de la route. Après avoir inspecté la totalité du tronçon, j'en ai conclu que le Dr Kondolf n'a pas réévalué son estimation en fonction de la totalité du tronçon car cela aurait conduit à exagérer l'apport total de sédiments en provenance de la route. C'est pourquoi, la limite supérieure de l'estimation du Dr Kondolf semble être proche des estimations réalisées pour l'ensemble de la route.

58. Comme cela est indiqué dans la section 5.4 ci-dessus, l'estimation de l'équipe costaricienne pour la totalité de l'apport au fleuve de sédiments provenant de la route s'élève à 36 500 m<sup>3</sup> par an, soit un tiers seulement de la limite supérieure de la fourchette estimée par le Dr Kondolf.

59. Comme je l'ai indiqué précédemment, fort de ma grande expérience à la fois de l'observation sur le terrain et du suivi de l'érosion, je considère que le taux moyen d'affaissement des terres retenu par le Dr Kondolf, soit 1 m<sup>3</sup> par an, dû aux glissements de terrain et au ravinement est certainement surévalué. Mes observations sur la totalité de la route me laissent penser également que l'estimation du Dr Kondolf selon laquelle 40 à 50 % des talus sont couverts par des glissements de terrain et des ravines est également excessive.

60. Néanmoins, pour déterminer si l'apport de sédiments en provenance de la route pourrait avoir un effet sur l'environnement du fleuve San Juan et sur la navigation sur le cours inférieur de ce fleuve, j'ai été invité à suivre la même procédure que le Dr Kondolf pour estimer le dépôt sédimentaire annuel moyen en provenance de la route, qui est deux à trois fois supérieure à l'estimation indiquée dans le rapport de l'ICE. Un tel exercice implique que j'approuve l'estimation du Dr Kondolf, qui est pour les raisons déjà exprimées, largement excessive de mon point de vue.

### **5.5.3. Charge sédimentaire annuelle moyenne dans le fleuve San Juan inférieur depuis décembre 2010**

61. Les charges sédimentaires dans le fleuve sont exprimées en masses (tonnes) et non en volume (mètres cubes). Dès lors, il est nécessaire de convertir l'estimation du Dr Kondolf d'un volume annuel en masse. Comme cela est observé dans les tableaux 4 et 5 ci-dessus, un mètre cube de sédiments a une masse d'environ 1,67 tonne. Cette valeur vaut en particulier pour les grains de sable de quartz très resserrés, même si elle pourrait être légèrement élevée pour de la terre (qui a une porosité plus importante). Elle est donc de ce point de vue prudente. Si l'on suppose que chaque mètre cube de terre a une masse de 1,67 tonne, la charge moyenne annuelle de sédiments provenant de la route apportée au fleuve San Juan atteint, selon le Dr Kondolf, 157 180 à 182 030 tonnes par an.

62. A titre de comparaison, l'équipe technique costaricienne estime que le taux d'apport de sédiments issus de la route atteint 60 800 tonnes par an, sur la base des mesures qu'elle a effectuées et qui sont décrites dans les annexes 1 et 2.

63. L'ICE contrôle le transport des sédiments en plusieurs stations de mesure situées dans le bassin du fleuve San Juan, y compris à Delta Colorado (Station 691104) située sur le fleuve Colorado en aval immédiat du Delta (voir Figure 1). Selon ses observations et comme expliqué dans le rapport de l'ICE, la charge totale annuelle moyenne (à savoir la charge de sédiments en suspension et la charge dans le lit) du fleuve transportée par le fleuve San Juan entre décembre 2010 et juin 2013 s'est élevée à environ 9 133 000 tonnes par an. Dans le rapport de l'ICE, il est estimé qu'au niveau du delta, 8 470 000 tonnes transitent vers le fleuve Colorado et 663 000 tonnes vers le fleuve San Juan inférieur.

### **5.5.4. Apport au fleuve San Juan de sédiments issus de l'érosion de la route**

64. Les sédiments issus de l'érosion de la route, selon les estimations du Dr Kondolf, équivalent à 1 ou 2 % de la charge sédimentaires totale charriée par le fleuve San Juan, ce qui à l'évidence est un pourcentage trop faible pour avoir un effet significatif sur le fleuve.

65. Si l'on suppose que 10 % de sédiments supplémentaires sont apportés au bassin inférieur du fleuve San Juan, l'apport annuel moyen de ces sédiments au même fleuve varierait de 15 718 à 18 203 tonnes, soit 2 ou 3 % de la charge totale du bassin inférieur du fleuve San Juan en aval du Delta.

#### **5.5.5. Impact potentiel sur la sédimentation dans le fleuve San Juan inférieur**

66. Le fleuve San Juan inférieur est long d'environ 30 km et présente une largeur de canal moyenne d'environ 90 mètres, soit une surface de lit d'environ 2,7 millions m<sup>2</sup>. Si l'on retient l'estimation du Dr Kondolf en ce qui concerne le dépôt sédimentaire dans le fleuve San Juan (87 000 à 109 000 m<sup>3</sup> par an), en partant de l'hypothèse prudente que 10 % de cette valeur est apportée au San Juan inférieur (8 700 à 10 900 m<sup>3</sup> par an), et en supposant que la totalité des sédiments provenant de l'érosion de la route se déposent dans le lit du San Juan inférieur (en l'absence de tout dépôt dans les plaines inondables et dans les zones humides, ni de transfert vers la mer des Caraïbes, ce qui est une hypothèse extrêmement prudente), la hausse moyenne du taux d'alluvionnement du lit serait de 3 à 4 mm par an .

67. Il apparaît immédiatement que l'ajout de l'apport supplémentaire de sédiments issus de l'érosion de la route, tel qu'estimé par le Dr Kondolf, à la charge sédimentaire annuelle totale du Rio San Juan inférieur ne saurait en aucun cas avoir empêché la navigation ou contraint le Nicaragua à engager un certain nombre d'actions telles que le dragage, pour préserver la capacité et la quantité des eaux du fleuve.

#### **5.5.6. Les apports de sédiments issus de l'érosion de la route ne sont pas juste insignifiants, ils sont indétectables**

68. Il convient de rappeler que la charge annuelle du fleuve San Juan n'est pas constante d'une année à l'autre mais qu'elle évolue, en réponse à la variabilité naturelle de la pluviométrie, du ruissellement, de l'érosion et de l'évolution du canal.

69. Comme cela est observé dans la section 5.2 ci-dessus, le suivi de la charge de sédiments en suspension dans le fleuve Colorado immédiatement en aval du delta entre 2010 et 2012 a révélé que bien que la charge annuelle moyenne de sédiments en suspension s'élève à 5 981 000 tonnes, l'intervalle de confiance de 95 % relative à la valeur moyenne oscillait entre 5 181 000 et 10 585 000 tonnes en raison de l'incertitude et de la variabilité naturelle des données mesurées. Autrement dit, il y a 95 % de probabilité que la charge suspendue charriée dans l'année se situe entre 5 181 000 et 10 585 000 tonnes, mais qu'il reste 5 % de probabilité que ce chiffre soit encore plus élevé ou plus bas. La variabilité de la charge annuelle du lit n'est pas connue, mais est probablement similaire ou supérieure à celle de la charge des sédiments en suspension. Il s'ensuit qu'utiliser la variabilité dans la charge de sédiments en suspension pour représenter la charge totale (à savoir la charge des sédiments en suspension plus la charge des sédiments présents dans le lit du fleuve) est une démarche prudente.

70. La variabilité observée dans les charges de sédiments en suspension indique que la charge annuelle totale de sédiments dans le fleuve Colorado serait d'environ +/- 20 % de la valeur moyenne, 95 % du temps.

71. Dans la mesure où environ 90 % du débit du fleuve San Juan est transmis au fleuve Colorado, il s'ensuit que l'intervalle de confiance de 95 % relatif à la charge moyenne annuelle en sédiments du fleuve San Juan doit être aux alentours de +/- 20 %. De même, comme 100 % du débit passant par le fleuve San Juan inférieur provient de ce même fleuve, l'intervalle de confiance de 95 % relatif aux charges de sédiments annuelles est également susceptible de varier de +/- 20 %.

72. La hausse d'1 ou de 2 % prévue, sur la base de la fourchette estimée par le Dr Kondolf en ce qui concerne le dépôt dans le fleuve San Juan de sédiments issus de l'érosion de la route s'inscrit bien dans la fourchette de variabilité naturelle des charges de sédiments dans le fleuve représentées par un intervalle de confiance de +/-20 %, ce qui signifie que même si une tel changement devait se produire dans la charge, il serait imperceptible et statistiquement indétectable dans les mesures de charge.

73. Le lit du fleuve San Juan inférieur est constitué de sable mobile, organisé en vagues et en dunes dont l'amplitude peut varier de quelques centimètres à plus d'un mètre. Le lit comporte également des bassins et des barres qui engendrent une grande variabilité de la profondeur du canal qui peut osciller entre plusieurs mètres et moins d'un mètre. Par conséquent, un changement du taux de sédimentation de 3 ou 4 mm par an (soit une fois et demie à deux fois le diamètre d'un seul grain de sable), serait imperceptible sur le terrain et impossible à mesurer même à l'aide d'un sonar de haute précision.

## 6. RÉPONSE AUX NOUVELLES DONNÉES TRANSMISES PAR LE NICARAGUA

74. Comme je l'ai indiqué au point 8 ci-dessus, j'ai été invité à examiner et à commenter les avis exprimés aux annexes 1 et 2 de la lettre HOL-EMB-223 et à l'appendice A soumis à la Cour par le Nicaragua le 1<sup>er</sup> novembre 2013.

75. Je note pour commencer que les éléments mentionnés à l'annexe 1 de la lettre HOL-EMB-223 sont largement répétés à l'annexe 2. L'annexe 1 de cette lettre rassemble des observations tirées d'une visite sur le terrain effectuée en mai 2013. Ces mêmes observations sont répétées et précisées dans l'annexe 2 de ce même document, aux pages 9 à 12. L'annexe 1 répète également la liste des «mesures urgentes recommandées» qui sont énoncées dans le rapport Kondolf 2012 et mentionnés dans la requête. Pour ces raisons, je concentrerai mes réponses sur les éléments contenus dans l'annexe 2.

76. A la page de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223 (par. 2), il est indiqué qu'en mai 2013, le Dr Kondolf «a observé plusieurs deltas de sédiments issus de l'érosion de la route, et charriés par les cours d'eaux locaux ou par des ruissellements issus d'érosions récentes vers le fleuve». Après avoir examiné les photographies de l'appendice A, je ne vois pas les éléments sur lesquels se fonde le Dr Kondolf pour affirmer avec une telle certitude que tous les deltas figurant sur les photographies étaient composés, dans leur intégralité ou pour l'essentiel de «*sédiments issus de l'érosion de la route*». Mes interrogations proviennent en partie du fait que la route n'est pas même visible sur de nombreuses photographies et que les autres sources potentielles de sédiments ne manquent pas sur la rive costaricienne du fleuve. Certaines de ces sources sont naturelles, d'autres sont dues à l'activité humaine, mais sont dans les deux cas sans rapport avec la route. Mais j'ai des raisons plus fortes encore pour remettre en cause le lien de causalité entre la route et les deltas, qui est si aisément établi dans l'annexe et l'appendice A. Comme indiqué au paragraphe 10 ci-dessus, j'ai également survolé la route au mois de mai 2013 et pu constater la présence de nombreux deltas alluvionnaires. Nombre d'entre eux étaient cependant situés sur la



rive nicaraguayenne du San Juan. Plusieurs de ces deltas semblaient beaucoup plus grands et sensiblement plus proéminents que ceux présentés à l'appendice A (dont quelques exemples sont illustrés par les figures 8 à 10). Ces deltas sont composés de sédiments générés par l'érosion en territoire nicaraguayen et déposés dans le San Juan par des affluents nicaraguayens du fleuve. Ils ne sauraient être des deltas alluvionnaires générés par des sédiments en provenance de la route.



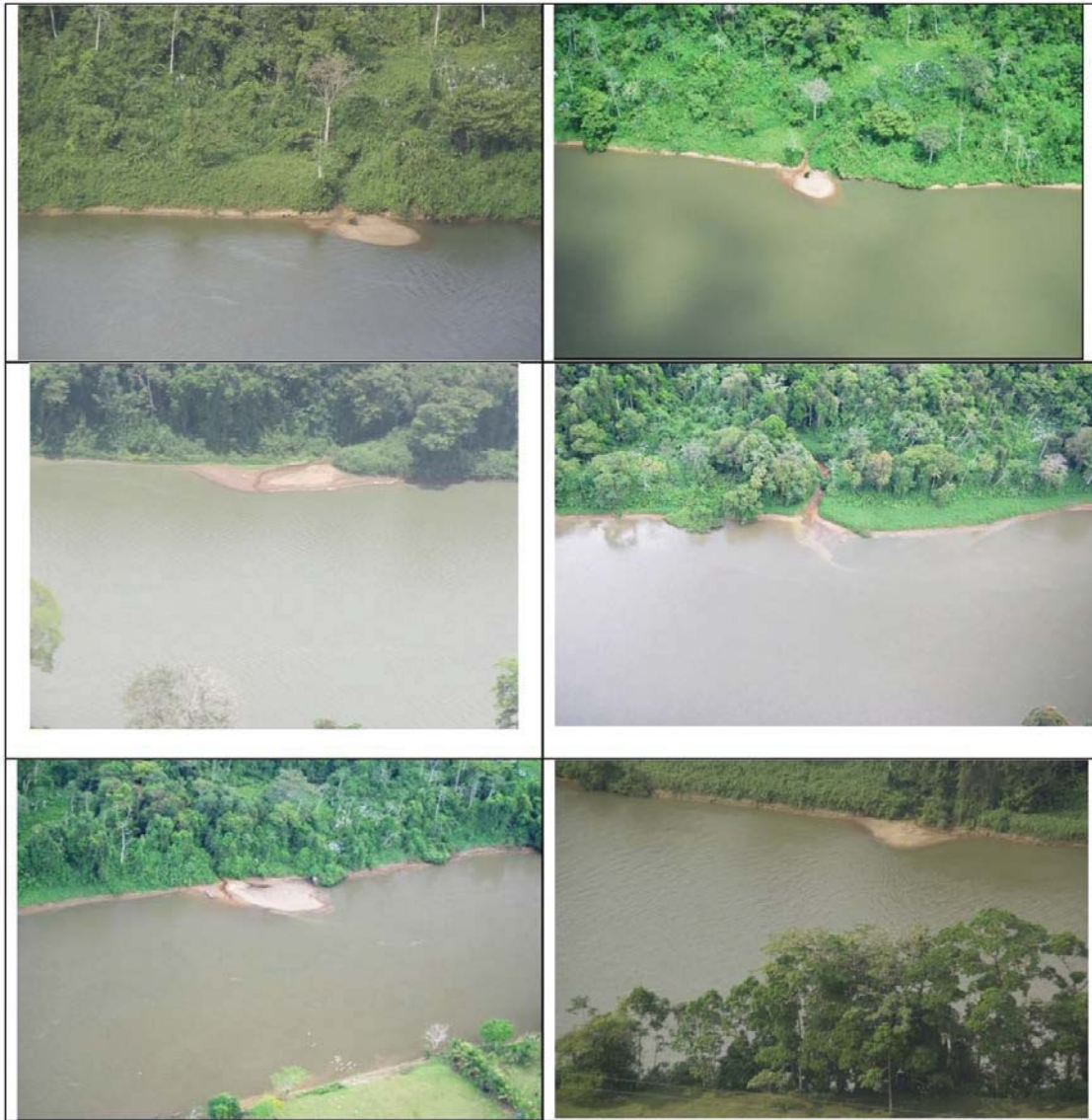
**Figure 8.** Delta sédimentaire important observé dans le fleuve San Juan à partir d'un hélicoptère depuis l'espace aérien du Costa Rica, le 7 mai 2013 *a)* de près, *b)* angle de vue plus large montrant clairement que ce delta est sur la rive gauche du fleuve (Nicaragua). La route 1856 est clairement visible sur la rive droite du fleuve (Costa Rica), (les deux photographies sont de l'auteur).



**Figure 9.** Delta sédimentaire important observé sur le fleuve San Juan à partir d'un hélicoptère depuis l'espace aérien du Costa Rica, le 7 mai 2013 (a) de près et (b) d'un angle de vue plus large montrant clairement que ce delta est sur la rive éloignée du fleuve (Nicaragua). La route 1856 est clairement visible en avant-plan du fleuve (Costa Rica) (les deux photographies sont de l'auteur).







**Figure 10.** Photographies prises de l'espace aérien du Costa Rica, le 7 mai 2013. Elles montrent que les deltas sédimentaires se produisent pour la plupart à partir des affluents de la rive gauche du fleuve San Juan. Les deltas sont indépendants de la route et sont formés par des sédiments déversés dans le San Juan par vidange des bassins hydrographiques intérieurs du territoire nicaraguayen.

77. Je ne suis pas d'accord sur le fait que les deltas sédimentaires du Río San Juan sont exclusivement, ni même principalement causés par le dépôt de sédiments érodés à partir de la route. Au contraire, les deltas font partie du système de transfert naturel des sédiments. Ils se forment lorsque des pluies diluviennes locales produisent un ruissellement chargé en sédiments provenant des affluents, la fraction grossière desquels est déposée dans le cours inférieur du chenal de l'affluent et autour de la zone de confluence entre l'affluent et le Río San Juan. Comme noté par le Dr Kondolf, ce dépôt est temporaire — les sédiments deltaïques sont érodés à nouveau et transportés en aval, se diffusant dans la charge sédimentaire du fleuve récepteur au cours de l'évènement de transport sédimentaire significatif suivant du fleuve. La taille limitée et le large écartement des deltas des affluents que j'ai observés dans le Río San Juan, en mai 2013, signifient qu'ils ne nuisent pas au fleuve. En effet, au contraire, les barres des affluents et les deltas sont bénéfiques pour les écosystèmes aquatiques et riverains par exemple, parce qu'ils offrent de nouvelles niches et de nouveaux habitats ouverts pour les espèces végétales pionnières — comme illustré par exemple, dans les photographies 1018, 1043 et 1046 de l'appendice A.

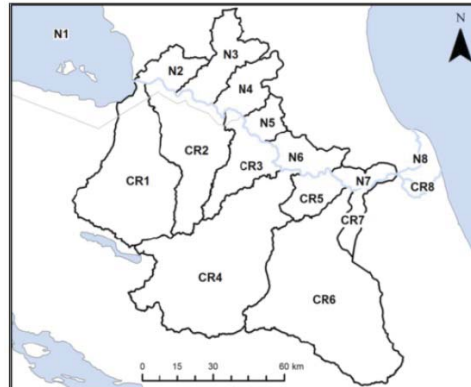
78. Dans l'examen des impacts de la construction de routes sur des rivières autres que le fleuve San Juan, l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223 fait référence, en page 7 (par. 2), aux incidences écologiques qui découlent de «la combinaison des effets hydrologiques et de l'accroissement de l'érosion et de la sédimentation, en raison de la construction de routes, provoquant des hausses importantes de charge sédimentaire pour les rivières et les ruisseaux, qui, à leur tour, ont été documentées en raison de graves problèmes environnementaux». Et, dans le paragraphe 5 de la page 7, «le transport d'énormes volumes de sédiments dans les rivières a entraîné d'importants dégâts écologiques». Ces déclarations sont entièrement générales dans leurs termes, et ne sont utiles que pour ce qui concerne la construction de routes augmentant la charge sédimentaire qui peut être légitimement décrite comme massive ou, à tout le moins, significative. Comme il est expliqué au point 5 ci-dessus, même si nous acceptons l'estimation haute du Dr Kondolf de 109 000 m<sup>3</sup> par an de sédiments érodés à partir de la route vers le fleuve San Juan (une estimation qui, je pense, est trop élevée d'un facteur 3, et qui intègre tous les apports en sédiments du fleuve considérés comme significatifs dans le rapport de 2012 de Kondolf, repris dans l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223), ceci contribue pour environ 2 % de la charge des sédiments transportés annuellement par le fleuve San Juan. En aucune manière, une telle augmentation ne peut être décrite comme massive ou même significative. Etant donné l'incertitude sur la charge sédimentaire, associée à la variabilité naturelle de la charge annuelle, une telle augmentation est non seulement négligeable, elle est indécélable.

79. A la page 8 (paragraphe 3), le Dr Kondolf évoque le diagnostic rapporté par Reid et Dunne (2003) selon lequel «les sédiments en lien avec les routes peuvent dominer le bilan sédimentaire dans de nombreuses rivières». S'il s'agit d'une proposition théorique et générale, je suis d'accord avec cette déclaration. Mais Reid et Dunne ne faisaient pas allusion au Río San Juan. Dans l'annexe 1, l'ICE construit un bilan sédimentaire spécifique à ce fleuve, le San Juan. Le résultat est représenté dans la figure 11 (reproduite à partir de l'annexe 1), qui illustre le fait que la contribution des sédiments en lien avec la route est minuscule dans le contexte de ce fleuve. Les sédiments en lien avec la route peuvent dominer le bilan sédimentaire dans de nombreuses rivières, mais le fleuve San Juan n'en fait pas partie.

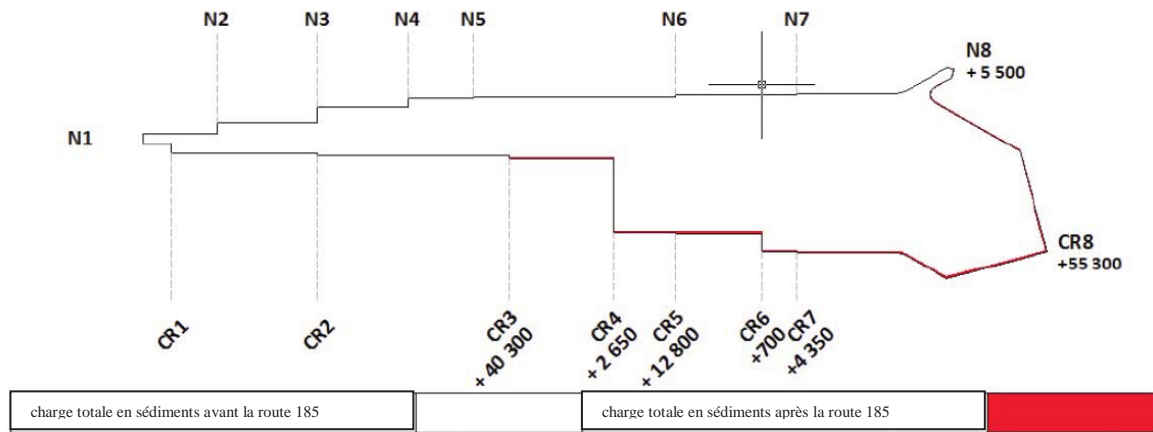


Symbologie :

- |                           |                         |
|---------------------------|-------------------------|
| N1 : Lac Nicaragua        | CR1 : bassin Frío       |
| N2 : bassin Melchora      | CR2 : bassin Pocosol    |
| N3 : bassin Sábalos       | CR3 : bassin Infiernito |
| N4 : bassin Santa Cruz    | CR4 : bassin San Carlos |
| N5 : bassin Bartola       | CR5 : bassin Cureña     |
| N6 : bassin Machado       | CR6 : bassin Sarapiquí  |
| N7 : bassin Las Banderas  | CR7 : bassin Chirripó   |
| N8 : Fleuve San Juan inf. | CR8 : Fleuve Colorado   |



Incrément total des sédiments dus à la Route 1856 (t/an)



**Figure 11.** L'augmentation de l'apport moyen annuel des charges sédimentaires dans le système San Juan — fleuve Colorado en raison de la construction de la route 1856 est illustrée par les lignes rouges dans cette version du diagramme du bilan sédimentaire. Les apports des sédiments en lien avec la route sont définis numériquement : par exemple, le changement le plus important de l'apport de la charge moyenne sédimentaire annuelle du fleuve San Juan est de 40 300 t/an à partir de CR5 (bassin Infiernito). L'étroitesse de la largeur de la bande rouge est correctement dimensionnée et elle décrit fidèlement le fait que les apports cumulatifs des sédiments de la route 1856 sont minimes par rapport aux charges avant la construction, qu'ils sont non seulement difficile à voir, mais sont sans importance et pratiquement indétectables (tiré de l'annexe 1 — rapport d'ICE).

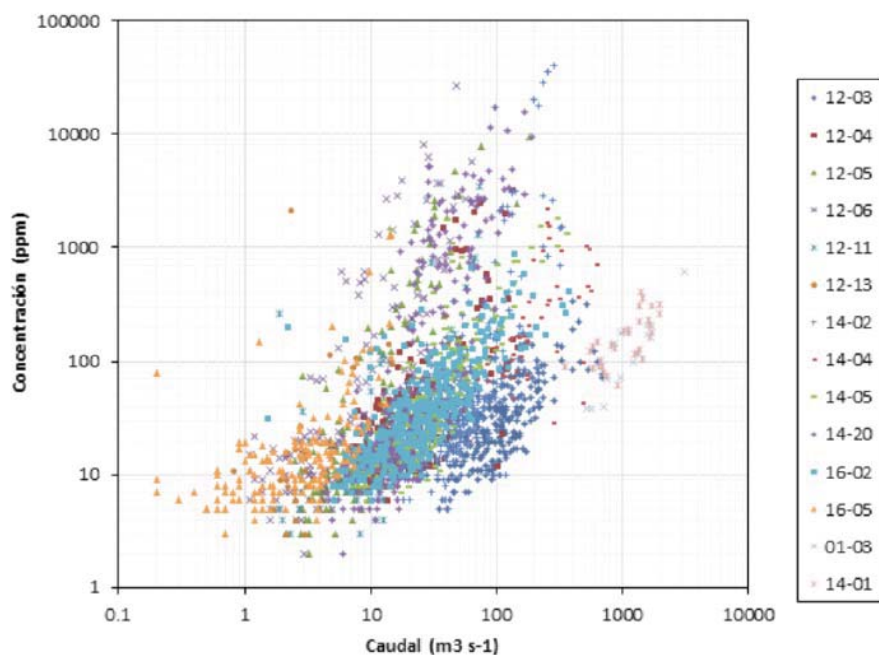
80. A la page 11 (paragraphe 2) de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, le Dr Kondolf rapporte les concentrations des sédiments en suspension dans trois échantillons d'eau boueuse dans les panaches du fleuve, eau qui était entrée dans le fleuve après une averse de 15 minutes. Les échantillons avaient des concentrations de sédiments en suspension (SSC) de 364, 459 et 483 grammes par mètre cube. Le Dr Kondolf décrit ces SSC comme «élevées». Il a également pris deux échantillons de l'eau du fleuve, qui ont tous deux des SSC de 8 grammes par mètre cube. Dans l'annexe 1, l'ICE ne rapporte pas cinq échantillons de SSC, mais 2 409. Le tableau 6 (reproduit à partir de l'annexe 1) répertorie les sources de données SSC pour le fleuve San Juan et les affluents du Costa Rica ; ces données sont présentées graphiquement dans la figure 12. L'ensemble des résultats figure dans l'appendice A de l'annexe 1.

**Tableau 6.** Propriétés des stations de jaugeage des sédiments dans le cas des bassins du Costa Rica. Drainage du fleuve San Juan (tiré de l'annexe 1, rapport de l'ICE).

Code Station	Nom Station	Bassin	Rivière	No. d'échant.	Période d'échant.	SSL (t/an)	SY (t/ha/an)
01-03	La Trinidad	San Juan	San Juan	12	1974-1976	7 995 000	1.92
11-04	Delta Colorado	San Juan	Colorado	31	2010-2013	5 981 000 <sup>a</sup>	-
12-03	Puerto Viejo	Sarapiquí	Sarapiquí	264	1970-1998	165 500	1.96
12-04	Veracruz	Sarapiquí	Toro	285	1972-2012	101 000	5.29
12-05	Bajos del Toro	Sarapiquí	Toro	137	1985-2001	50 000	6.85
12-06	Toro	Sarapiquí	Toro	117	1995-2010	20 500	5.00
12-11	San Miguel	Sarapiquí	Volcán	47	1998-2010	23 000	3.90
12-13	Río Segundo	Sarapiquí	Segundo	25	1999-2009	1 800	1.06
14-02	Jabillos	San Carlos	San Carlos	338	1967-2011	600 000	10.9
14-04	Terrón Colorado	San Carlos	San Carlos	53	1998-2009	1 300 000	8.35
14-05	Peñas Blancas	San Carlos	Peñas Blancas	308	1970-2011	157 000	5.36
14-20	Pocosol	San Carlos	Peñas Blancas	278	1980-2012	358 000	28.9
16-02	Guatuso	Frío	Frío	361	1970-2012	60 800	2.40
16-05	Santa Lucía	Frío	Venado	153	1984-2011	8 100	2.38

Note : SSL = charge sédimentaire en suspension ; SY = rendement spécifique.

<sup>a</sup> Cette valeur est mesurée au niveau du fleuve Colorado. Par conséquent, elle n'est pas directement comparable à la charge sédimentaire en suspension à la station La Trinidad (01-03).



Remarque : 1 gramme par mètre cube = 1 partie par million (ppm)

**Figure 12.** Concentration des sédiments en suspension en fonction de la décharge pour 2409 échantillons prélevés dans le fleuve San Juan et les affluents du Costa Rica. Remarque : La station 14-01 dans la légende correspond au delta du Colorado (Station 11-04) dans le tableau 6 (à partir de l'annexe 1, rapport d'ICE).

81. Les SSC (concentrations de sédiments en suspension) mesurées dans ce plus grand ensemble de données varient de moins de 10 ppm (ou grammes par mètre cube - les deux mesures de SSC étant équivalentes) à plus de 10 000 ppm. Tandis le bruit de fond de SSC dans le fleuve, tel que mesuré par le Dr Kondolf, est effectivement très faible, les concentrations dans le panache d'eau boueuse ne sont pas élevées dans le contexte des SSC couramment observées dans les eaux de ruissellement du Río San Juan, ou même dans le fleuve lui-même. Je ne suis pas surpris qu'un orage de 15 minutes en mai, ait produit un contraste frappant entre les SSC du ruissellement local et les eaux réceptrices parce que, dans ces circonstances, la source des sédiments est localisée au niveau de la zone de l'orage alors que toute la décharge et le bruit de fond de SSC du fleuve sont à leur plus bas niveau. Toutefois, le volume de l'eau boueuse est une minuscule fraction de la décharge la plus basse du Río San Juan et un mélange turbulent permettrait de s'assurer que la SSC *relativement haute* diminue vers des niveaux de bruit de fond à une courte distance en aval, peu de temps après la fin de l'orage, alors que le panache de ruissellement local se diffuse dans un flux plus grand d'eau réceptrice.

82. A deux exceptions près, l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223 adopte une approche descriptive en présentant une revue de la littérature sur les impacts de la construction de routes sur les rivières autres que le Río San Juan (très similaires, voire identiques aux éléments présentés précédemment dans le rapport de Kondolf de 2012), de concert avec commentaire textuel et une visite virtuelle d'un exemple typique, tous deux sur 41 km de la route entre le marqueur 2 et le fleuve Infiernito. Les cinq échantillons de sédiments en suspension constituent une exception à cette approche. L'autre exception est constituée par les résultats de l'échantillonnage du périphyton sur neuf sites du fleuve par le Docteur, à la fin mai 2013. À la page 13 (paragraphe 1) de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, il est indiqué clairement que quatre échantillons provenaient des deltas dont le Dr Kondolf supposait qu'ils étaient composés de sédiments érodés par la route sur la rive sud du fleuve (Costa Rica). Le texte est moins clair concernant la nature des sites d'échantillonnage sur la rive nord (Nicaragua). On nous a dit qu'il s'agissait de «cinq sites drainant des paysages relativement intacts». On ne nous dit pas si ces sites sont sur les deltas multiples que j'ai observés sur la rive nicaraguayenne du fleuve au début de ce mois. C'était le cas, alors il serait juste de les comparer entre eux ; si ce n'était pas le cas, alors la comparaison entre les échantillons pris sur les rives nord et sud est inappropriée.

83. Globalement, rien ne me permet d'appuyer la déclaration faite au paragraphe 4, page 2 de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, selon laquelle le Dr Kondolf et son équipe «ont déjà vu les dommages importants voire graves causés à l'environnement». En ce qui concerne l'exemple typique des dommages irréversibles sur le fleuve San Juan, cette déclaration semble être en contradiction avec les photographies de l'appendice A, et *a fortiori* les preuves fournies dans le présent rapport, qui sont étayées par les données fournies dans les **annexes 1 et 2**. Dans le même paragraphe, la déclaration selon laquelle «il n'y a pas de doute que, lorsque les pluies abondantes associées aux tempêtes tropicales et aux ouragans se produisent, les dommages seront généralisés et graves». En effet, c'est vrai. L'échelle à laquelle de tels événements provoquent des dommages minimise simplement les dommages causés par la route. Par exemple, en 1998, l'ouragan Mitch a détruit non pas 41 km, mais 1300 km de routes au Costa Rica seul, mais pas dans la région du fleuve San Juan. Le fait est que, si cette région devait subir une tempête tropicale ou un ouragan, non seulement ce serait catastrophique, ce serait également sans précédent. Étant donné que cette région n'a jamais été frappée par un ouragan ou une tempête tropicale (à ce sujet, voir la carte de la United States National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) qui est fournie en tant qu'**annexe 8**, qui indique qu'aucun ouragan ou tempête tropicale n'a été enregistré dans la zone jusqu'à aujourd'hui), il ne peut pas être dit qu'il n'y a aucun risque grave ou imminent qu'un tel événement inflige ce genre de dommages à la région. Dans la dernière partie du paragraphe 4, page 2 de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, le Dr Kondolf fait référence à un dommage irréversible fait aux saumons par l'exploitation minière massive en Californie et l'exploitation

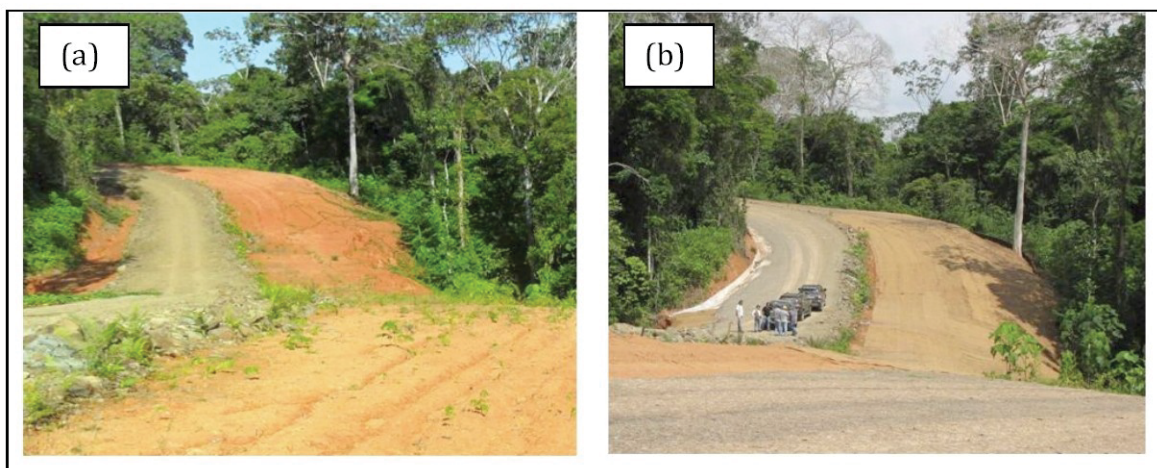
forestière extensive dans la région nord-ouest du Pacifique. Cela contraste avec les déclarations du rapport de 2012 de Kondolf, qui attribue la disparition des populations de saumons du Pacifique aux USA à la construction des routes, ce qui n'était pas le cas. Mais il n'y a pas de saumons dans le fleuve San Juan et, en tout cas, la construction d'une route qui augmente la surface imperméable des bassins hydrographiques du Costa Rica vers le fleuve San Juan de 0,05 % ne peut pas être comparée aux pratiques à l'échelle du bassin versant de l'exploitation minière hydraulique et des coupes claires dans les forêts, qui ont lieu en Californie et dans le nord-ouest du Pacifique.

## 7. MES OBSERVATIONS DES TRAVAUX D'ATTÉNUATION SUR LA ROUTE EN MAI 2013

84. Lors de ma première visite à la route 1856 en février 2013, j'ai inspecté les travaux d'atténuation en construction à plusieurs endroits, le long de la route entre le marqueur 2 et le fleuve Infiernito, y compris en parlant avec les ingénieurs principaux de Conservando Mejorando y Construyendo la Red Vial Nacional – du Conseil national des autoroutes (CONAVI) (<http://www.conavi.Ro.cr/>). Un ingénieur de l'entreprise principale MECO (<http://constructorameco.com>), ainsi qu'un ingénieur de l'entreprise Durman chargée du matériel (<http://www.durman.com/inicio.htm>).

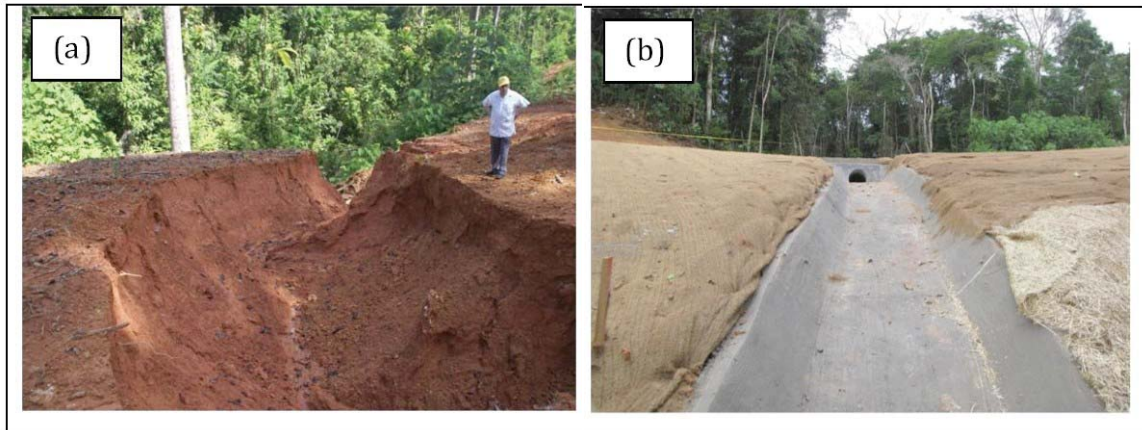
85. Lors de ma deuxième visite à la route en mai 2013, je me suis particulièrement concentré sur le tronçon de 41,6 km entre le marqueur 2 et Boca San Carlos, notamment en inspectant les travaux d'atténuation effectués depuis ma visite de février. En me basant sur ce tronçon dans le rapport de 2012 de Kondolf, mes propres observations de saignées en cours d'érosion et de talus de remblayage, en février 2013, ma conclusion a été qu'il n'y avait que très peu de talus en cours d'érosion le long de la route entre Boca San Carlos et le delta. J'ai été accompagné sur le terrain par M. Carlos Pereira qui était, à l'époque, à la direction des efforts d'atténuation, pour le compte du CONAVI. J'ai aussi profité de l'occasion pour inspecter certains des sites proposés à la surveillance de l'érosion par l'Université du Costa Rica (voir le rapport de l'UCR pour un compte rendu complet).

86. Les photographies avant et après les travaux d'une sélection représentative des sites d'atténuation que j'ai visités sont incluses ci-dessous dans les figures 13 à 18.



**Figure 13.** La route près du marqueur II *a)* avant les travaux d'atténuation, le 15 février 2013, et *b)* le 7 mai 2013, avec les mesures d'atténuation mises en place. Veuillez noter les chenaux de drainage internes et le tapis de contrôle de l'érosion étendu et biodégradable. Photographies par l'auteur.

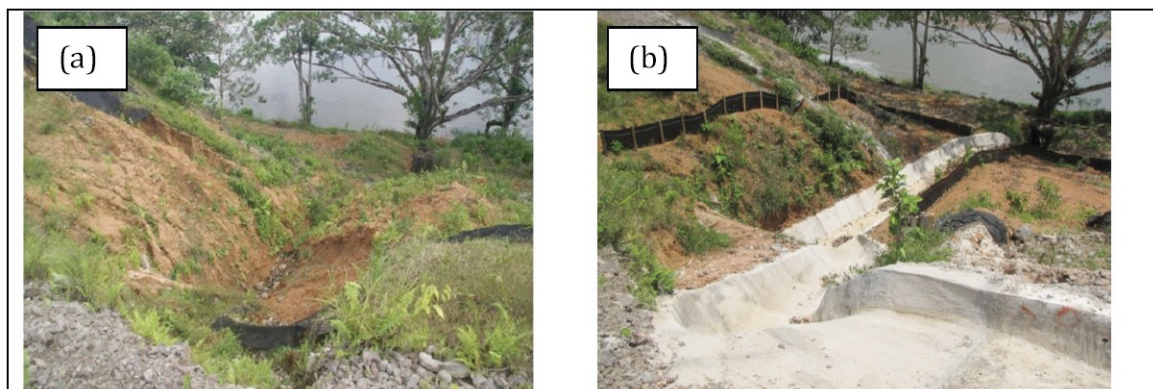




**Figure 14.** Vue vers le bas d'un grand ravin dans un prisme de remblaiement créé par le ruissellement à partir du drainage de la route vers le territoire du Costa Rica, à l'ouest du marqueur 2 *a)* en février, lorsqu'il a été activement érodé et *b)* en mai lorsque le ravin a été rempli et stabilisé à l'aide d'un fossé de traverse couvert et un chenal de drainage en béton, avec des tapis de coco utilisés pour protéger les talus de remblaiement environnants de l'érosion en nappes et en rigoles.

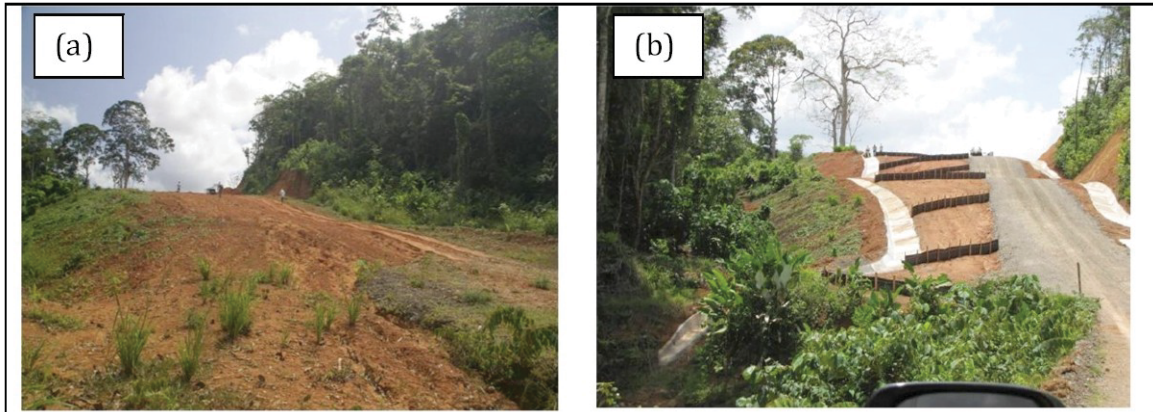


**Figure 15.** Route à proximité de Tiricias *a)* le 15 février lorsque la défaillance de la protection en géotextile de la pente avait permis à un ruissellement extérieur provenant de la route de créer deux ravins et à un ruissellement extérieur d'entailler une pente érodée *b)* le 7 mai 2013 après la construction d'une tranchée bétonnée extérieure et de fossés.

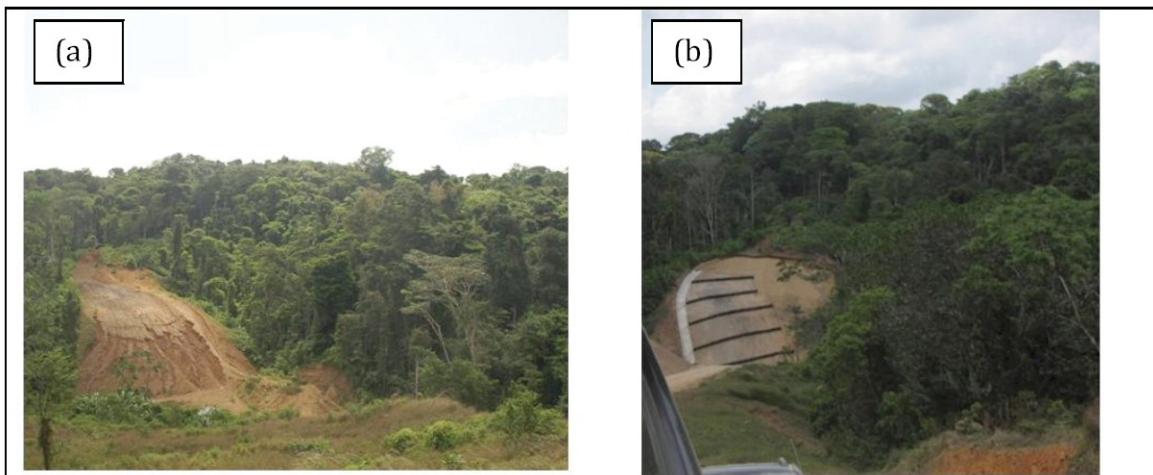


**Figure 16.** Route entre le marqueur 2 et le Río Infiernito *a)* le 15 février 2013 montrant des réseaux de ravins sur la pente vers l'extérieur et les sédiments accumulés en dépôts en coulée sur une surface plate en terrasse séparant le pied de la pente de la rive du Río San Juan *b)* le 7 mai 2013 montrant les travaux d'atténuation y compris les canaux en béton et les structures en goutte transmettant le ruissellement provenant de la chaussée et les barrières à limon protégeant la pente de l'érosion en nappes et en rigoles et empêchant les sédiments venant de la route d'atteindre la terrasse.





**Figure 17.** Route proche du Río Infiernito *a)* le 15 février lorsqu'un ruissellement de surface non géré provenant de la plate-forme et les versants perturbés au cours de la construction avait causé une érosion en nappes et en rigoles des surfaces du sol nu, *b)* même tronçon de route, le 7 mai 2013 après protection de surface de la route à l'aide de cailloux, de l'installation de barrières à limon empêchant l'érosion en nappes et en rigoles, tout en dirigeant vers le bas de la pente le ruissellement de surface à l'intérieur des fossés intérieurs et extérieurs revêtus de béton. Photographies de l'auteur.



**Figure 18.** Route à proximité Río Infiernito *a)* le 15 février, lorsque le ruissellement non géré à partir du chemin tracé dans le cadre de la préparation de la construction de la plate-forme avait provoqué une érosion en nappes et en rigoles, *b)* la même zone de la route le 7 mai 2013 après l'installation de mesures intégrées gérant les eaux de ruissellement, comprenant des travaux de déblai et de remblai, des barrières à limon et un fossé extérieur bétonné. Photographies de l'auteur.

87. Sur la base des observations de la route le 15 février et le 7 mai 2013 signalés ci-dessus, il peut être conclu que, au cours de la période d'intervention, d'importants travaux d'ingénierie ont été effectués par MECO (supervisé par le CONAVI) à plusieurs endroits, le long de la route entre le marqueur 2 et Boca San Carlos, dont ceux illustrés dans les figures 13-18 sont un échantillon représentatif. J'ai également observé de vastes zones de reboisement réalisées par des entrepreneurs locaux.

88. J'ai également étudié le Programme pour la consolidation et l'amélioration continue de la route n° 1856 du Conseil national des autoroutes (CONAVI) Référence DIE-02-13-3107, 25 octobre 2013 (annexe 3) ; le rapport d'Ana Lorena Guevara Fernández, vice-ministre de l'environnement du Costa Rica, d'Enrique Castillo Barran, ministre des affaires étrangères du Costa Rica, référence DVM-293-2013, 8 octobre 2013 (annexe 5) ; et de la Commission pour le développement forestier (CODEFORSA), les Services de consulting pour le développement et la mise en œuvre d'un plan environnemental pour la route frontalière Juan Rafael Mora Porras, le rapport d'activités du ministère des affaires étrangères de la République du Costa Rica, janvier 2013 (annexe 6). Ces rapports détaillent la suite des travaux afin de réduire tout risque d'érosion présenté par la route. Je ne suis pas d'accord avec la recommandation de la phrase liminaire du paragraphe 4, page 2 de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, selon laquelle, «si le travail se poursuit sur la Route 1856, son impact sera dévastateur dans les zones directement touchées et pour les eaux en aval». Au contraire, je considère que les travaux d'atténuation devraient se poursuivre afin de minimiser le risque d'érosion future si des précipitations devaient se produire.

89. En me fondant sur mon expérience en matière d'ingénierie et de travaux d'atténuation biotechniques de l'érosion dans d'autres régions connaissant de fortes précipitations, notamment en Ethiopie, au Bangladesh et aux USA, j'estime que les mesures prises par le Costa Rica ont réduit et continueront de réduire le risque que l'érosion importante susceptible de se produire pendant les fortes averses, comparativement aux conditions suivant immédiatement la construction de la route. Par conséquent, je ne suis pas d'accord avec la conclusion du paragraphe 3, page 2 de l'annexe 2 de la lettre HOL-EMB-223, selon laquelle «les travaux de contrôle de l'érosion et de drainage ont été inefficaces».

90. Je crois comprendre que les mesures que j'ai observées en mai 2013 font partie des efforts en cours visant à réduire les risques d'érosion résultant de la façon dont la route a été construite en 2011 et qu'ils ne sont pas destinés à fournir une solution permanente à l'érosion. Etant donné que mon expérience suggère qu'avec une inspection appropriée et, le cas échéant, un entretien ou une réparation, les travaux d'atténuation permettent de réduire de manière significative les taux d'érosion pour l'année qui vient ou les deux prochaines années, ce qui laisse le temps aux travaux nécessaires pour la conception, la conclusion de contrats et la construction d'ouvrages permanents de progresser.

## **8. CONCLUSIONS SUR LE RISQUE DE DOMMAGES IRRÉVERSIBLES DU FLEUVE**

91. Il n'y a aucune justification scientifique pour que l'on parle d' «un certain nombre d'actions telles que le dragage afin de préserver la capacité et la quantité des eaux du fleuve» dans le Río San Juan inférieur, au prétexte de devoir retirer des sédiments provenant de la route. Les calculs du transfert des sédiments et de sédimentation basés sur les données mesurées et les hypothèses prudentes démontrent que, même en utilisant l'ensemble des contributions sédimentaires de la route vers le fleuve indiqué dans le rapport de 2012 de Kondolf (valeurs presque certainement 2 à 3 fois trop élevées, et qui intègrent tous les apports sédimentaires, y compris les mouvements de masse), la quantité additionnelle de sédiments provenant de la route entrant dans le cours inférieur du fleuve San Juan ne représente probablement que 2 % ou 3 % de sa charge totale. La continuité sédimentaire implique que, même si tous ces sédiments ont été déposés sur le lit du canal, cela lui permettrait de faire remonter le lit du fleuve de seulement 3 ou 4 mm par an. En fait, les dépôts sont répartis sur une zone beaucoup plus vaste de plaines d'inondation, de zones humides et cônes alluviaux et un pourcentage inconnu, mais significatif de la charge est rejeté dans la mer des Caraïbes. Par conséquent, les estimations de l'augmentation de

la charge sédimentaire et des couches de dépôts sont forcément surestimées. Elles sont en tout cas bien dans la marge d'erreur des mesures et des calculs des sédiments, et sont modestes en comparaison des fluctuations interannuelles qui sont le produit de la variabilité naturelle.

92. Des enquêtes et des calculs similaires pourraient être réalisés en ce qui concerne les autres impacts potentiels de la route sur le fleuve San Juan mentionnés dans la demande. En résumé, en raison d'une très petite contribution relative des sédiments, comparé à la lourde et très variable charge sédimentaire de ce fleuve, la route ne peut poser un risque imminent, un dommage irréversible de la morphologie, de l'environnement, ou de l'écologie, qui sont tous bien adaptés à la forte charge et au régime sédimentaire très variable du fleuve San Juan.

## **9. RÉFÉRENCES**

- ICE (Institut de l'électricité du Costa Rica) 2013. Report on hydrology and sediments for the Costa Rican river basins draining to the San Juan River. Federico Gómez Delgado, Juan José Leitón Montero et Carlos Aguilar Cabrera, Centre for Engineering Studies, Department of Hydrology, San José, Costa Rica (**annexe 1**).
- UCR (University of Costa Rica) 2013. Systematic Field monitoring of Erosion and Sediment Yield along Route 1856. Rafael Oreamuno Vega, M. Eng. et Roberto Villalobos Herrera, Universidad De Costa Rica, Facultad De Ingeniería, Escuela De Ingeniería Civil (**annexe 2**).

## **10. DÉCLARATION CERTIFIANT LE CARACTÈRE INDÉPENDANT ET VÉRIDIQUE DES OPINIONS FORMULÉES DANS LE PRÉSENT RAPPORT**

93. Les opinions que j'ai exprimées dans ce rapport représentent mon avis professionnel sincère et complet. Lorsque je me suis appuyé sur des informations ou des faits qui m'ont été fournis par ceux qui m'ont mandaté, je l'ai indiqué dans mon rapport.

94. Je comprends que mon premier devoir est envers la Cour, tant dans la préparation de ce rapport, que sous forme orale, si nécessaire. J'ai respecté et continuerai de me conformer à cette obligation.

95. J'ai exposé dans mon rapport, ce que j'ai pu comprendre des questions de ceux qui m'ont mandaté, à l'égard desquelles mon avis d'expert est requis. J'ai fait tout ce qui était en mon pouvoir, dans la préparation de ce rapport, pour être exact et complet. J'ai fait état de tous les points que je considère pertinents pour l'opinion que j'ai exprimée. Je considère que toutes les questions sur lesquelles j'ai exprimé une opinion relève de mon champ d'expertise. J'ai attiré l'attention de la Cour sur toutes les questions, dont j'ai conscience qu'elles peuvent contredire mon avis.

96. Lors de la préparation de ce rapport, je n'ai eu connaissance d'aucun conflit d'intérêt réel ou potentiel susceptible d'influer sur ma capacité à exprimer mon avis d'expert indépendant. Je confirme que je n'ai pas conclu d'arrangement pour lequel le montant ou le paiement de mes honoraires dépend du résultat de cette procédure, de quelque manière que ce soit.

97. Je n'ai inclus, pour exprimer un point de vue indépendant, quoi que ce soit m'ayant été suggéré par d'autres, y compris ceux qui m'ont mandaté.

98. Au moment de signer le présent rapport, je considère qu'il est complet et présente une évaluation précise des informations dont je dispose, sous réserve des précisions mentionnées dans ce document. J'aviserai ceux qui m'ont mandaté si, pour une raison quelconque, j'envisage, par la suite, une correction matérielle ou une précision nécessaire du rapport.

99. Je comprends que ce rapport constitue le témoignage que j'effectuerai, si nécessaire, sous serment, sous réserve de toute correction ou précision que je pourrai apporter, avant de jurer, sous serment, sa véracité.

100. L'essence de tous les faits et les instructions qui m'ont été fournis et qui sont importants pour les opinions exprimées dans le présent rapport ou sur lesquelles ces opinions sont fondées, sont consignées dans mon rapport.

101. Je confirme que j'ai compris quels faits et quelles questions visées dans le présent rapport font partie de mes propres connaissances et quels sont ceux qui ne le font pas. Je confirme que ceux qui sont issus de ma connaissance propre sont véridiques. Les opinions que j'ai exprimées représentent mon avis professionnel sincère et complet.

Professeur Colin Thorne  
2 Parker Gardens  
Nottingham  
UK  
Le 4 novembre 2013.

---

## ANNEXE 10

### **COSTA RICA, CENTRE DE SCIENCES TROPICALES (CENTRO CIENTÍFICO TROPICAL, CCT) DIAGNOSTIC DE L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT ROUTE 1856 — VOLET ÉCOLOGIQUE DU PROJET - NOVEMBRE 2013**

#### **Glossaire**

**Affluent** : formation aquatique qui ne se jette pas dans la mer, mais dans un fleuve, en un point désigné par le terme de confluence.

«**Agrippants**» : organismes qui s'agrippent et que l'on trouve dans les formations aquatiques à fort courant, souvent dotés d'organes (griffes longues et puissantes, crochets, ventouses) qui leur permettent de s'accrocher à leur environnement.

**Autotrophes** : organismes ayant la capacité de synthétiser tous les éléments essentiels à leurs besoins métaboliques sans substances organiques et n'ayant donc pas besoin d'autres organismes vivants pour se nourrir.

**Benthique** : se dit de la communauté constituée des organismes vivant dans le fond des écosystèmes aquatiques.

**Bioindicateur** : organisme sélectionné pour son degré de sensibilité ou de tolérance aux divers types de pollution ou à leurs effets. Il permet de mesurer ou de quantifier l'ampleur de la perturbation et le degré de réaction biologique à ladite perturbation.

**Boisé** : se dit d'un espace couvert par une végétation naturelle composée d'arbres présentant des surfaces variables, qu'il soit supérieur ou non à 2 hectares.

**Borne frontière ou point de repère frontalier** : structure artificielle généralement utilisée pour définir les limites de propriétés ou de territoires.

**Branchie** : ouïes ; organes respiratoires des animaux aquatiques permettant l'extraction de l'oxygène dilué dans l'eau et le rejet du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dans l'environnement.

**Caño** : chenal, cours s'écoulant à travers un terrain boueux et inondé ou des zones humides palustres ou lacustres, dont la profondeur et l'apparence évoluent en fonction du niveau d'eau.

**Collecteurs** : organismes qui collectent les particules fines se déposant à la surface de l'eau.

**Communauté** : groupe d'organismes constitué de toutes les espèces coexistant dans un espace défini appelé biotope, qui offre les conditions environnementales nécessaires à la survie du groupe.

**Couloir biologique** : territoire assurant une liaison entre des paysages, des écosystèmes et des habitats, naturels ou modifiés, et garantissant la présence d'une diversité biologique et de processus écologiques.

**Débit** : courant, quantité d'eau qui se déplace dans une partie d'un fleuve au cours d'une unité de temps donné.

**Densité** : nombre d'organismes présents dans une zone ou un volume définis.

**Détritus** : résidus, généralement solides et permanents, résultant de la décomposition de matières organiques (végétales et animales) ; matière morte.



**Diversité** : qui a trait au nombre ou à la richesse des espèces, ainsi qu'à l'égalité entre les individus ou à leur abondance relative entre espèces.

**Domage** : destruction légère ou partielle d'un élément.

**Epilithique** : organisme qui se développe à la surface des substrats durs.

**Espace interstitiel** : espace ou crevasse entre deux corps ou deux parties d'un corps.

**Espèce endémique** : taxon limité à une zone géographique réduite et que l'on ne trouve à l'état naturel dans aucune autre partie du monde.

**Extinction** : disparition de tous les individus d'une espèce ou d'un groupe taxonomique ; une espèce est dite éteinte lorsque le dernier individu meurt.

**Filtres** : organismes qui se nourrissent de matières organiques fines, très fines ou sous forme de particules en suspension, qu'ils collectent à l'aide de villosités buccales ou de filets de soie.

**Forêt** : végétation naturelle d'un écosystème forestier d'une superficie de plus de 2 hectares.

«**Fragmenteurs**» : organismes qui mastiquent de gros morceaux de plantes vasculaires pour se nourrir.

«**Gratteurs**» : organismes qui se nourrissent de périphyton et de microbes qui adhèrent aux roches et autres substrats.

«**Grimpants**» : organismes vivant dans les parties immergées des plantes aquatiques.

**Habitat** : zone dans laquelle des organismes vivent et se développent de façon naturelle.

**Lacustre** : qui existe ou se développe dans des eaux présentant peu ou pas de mouvements (Gomez 1984 in Kappelle 2008).

**Lentique** : système d'eaux continentales stagnantes présentant peu de mouvements et d'échanges ; par exemple, les formations aquatiques composées d'eaux émergentes, de lacs, d'étangs, de marais et de marécages (Mata et Quevedo 2005 in Kappelle, 2008).

**Macroinvertébré benthique** : animal invertébré vivant tout ou partie de son cycle de vie dans le fond ou le substrat de la couche inférieure des formations aquatiques d'eau douce et dont la taille permet une observation à l'œil nu, sans instrument.

**Morbilité** : proportion d'organismes qui développe des pathologies sur un site au cours d'une période donnée.

**Mortalité** : nombre d'individus d'une population qui décède au cours d'une période donnée.

**Nageurs** : organismes qui vivent en immersion permanente et sont capables de nager en effectuant des mouvements similaires à ceux des poissons ; organismes passant leur temps accrochés à des roches, des racines de plantes aquatiques ou d'autres objets immergés.

**Niveau trophique** : chacun des groupes d'espèces ou d'organismes d'un écosystème se trouvant au niveau qu'il occupe dans le système de circulation de l'énergie et des nutriments, c'est-à-dire, les espèces ou organismes occupant une place équivalente dans la chaîne alimentaire.

**Palustre** : se dit en présence d'eaux peu profondes stagnantes ou à faible mouvement présentant une végétation émergente, sur au moins 30 % de la superficie d'une zone (Gomez 1984, in Kappelle 2008).

**Patineurs** : organismes vivant à l'air et patinant sur la pellicule de surface de l'eau.

**Phytoplancton** : groupe d'organismes aquatiques qui sont des espèces autotrophes de plancton, disposent d'une capacité de photosynthèse et vivent dispersés dans l'eau.

**Plancton** : groupe d'organismes, principalement microscopiques, vivant dans les eaux salées ou douces et dont le mouvement est passif.

**Plongeurs** : organismes qui plongent et nagent pour se nourrir et sont souvent accrochés à des objets immergés.

**Pont Bailey** : pont métallique préfabriqué portatif conçu principalement pour un usage militaire et utilisé dans de nombreux pays comme pont provisoire dans l'attente de la construction d'une structure permanente.

**Ponte** : libération d'œufs de poissons, de reptiles et d'amphibiens dans l'environnement.

**Population** : groupe d'organismes ou d'individus de la même espèce qui coexistent dans un espace et sur une période donnée et partagent certaines caractéristiques biologiques conduisant à une forte cohésion reproductive et biologique au sein du groupe.

**Prédateurs** : herbivores et autres organismes qui se nourrissent d'autres organismes.

«**Rampants**» : organismes qui vivent dans des habitats ou microhabitats présentant moins de courant et qui rampent à la surface du substrat inférieur, sur les roches, les sédiments, les feuilles et le bois.

**Richesse** : nombre d'espèces que compte une communauté.

**Rivière/fleuve** : cours d'eau naturel qui s'écoule de façon permanente, présente un cours défini et constant pendant tout son cycle annuel et se jette dans la mer, dans un lac ou dans un autre fleuve ou rivière (auquel cas le cours d'eau est considéré comme un affluent).

**Sédiment** : matière solide accumulée sur la surface terrestre (lithosphère), issue de l'action de phénomènes et de processus sur l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère (vents, variations de température, précipitations, circulation des eaux de surface ou souterraines, déplacement de masses d'eau dans des environnements marins ou lacustres, agents chimiques) ou de l'action d'organismes vivants.

**Suivi** : utilisation systématique de réactions biologiques afin d'évaluer les modifications de l'environnement en vue de la mise en œuvre de programmes de conservation et de contrôle.

**Talus** : surface en pente, surface de terrain inclinée ou structure inclinée artificielle faisant partie de travaux d'ingénierie.

«**Yolillal**» : se dit d'une parcelle présentant un écosystème tropical basique qui se développe généralement à proximité des côtes, subit régulièrement des inondations et dans laquelle prédomine une espèce de palmier appelée «yolillo» (*Raphia taedigera*) (Kappelle 2008).

**Zone humide** : zone couverte d'eau présentant généralement une végétation naturelle et semi-naturelle et très souvent une très grande diversité d'organismes.

## **Acronymes**

**CCT** : Centre de sciences tropicales

**CBF** : couloir biologique frontalier

**DHP** : diamètre à hauteur de poitrine (1,30 mètre)

**FSJ** : fleuve San Juan, à la frontière entre le Costa Rica et le Nicaragua

**ICE** : régie costa-ricienne d'électricité

**IGN** : Institut géographique national

**RNVSM** : Refugio Nacional de Vida Silvestre Mixto Maquenque

**UCR** : Université du Costa Rica

## **1. Résumé**

Le ministère des affaires étrangères du Gouvernement du Costa Rica a fait appel aux services du Centre de sciences tropicales (CCT) afin d'effectuer un diagnostic de l'impact sur l'environnement du projet dit de la route 1856, en raison notamment des 15 ans d'expérience du CCT dans le domaine, de sa connaissance des écosystèmes et de sa réputation scientifique internationale.

Le projet consiste en la construction d'une route non asphaltée partant de la localité de San Jeronimo, près de la ville de Los Chiles, et s'étendant complètement à l'est jusqu'à un site appelé Delta Siete (mieux connu localement sous le nom de Delta Costa Rica). La longueur totale de la route est de 159,7 km, dont 101,5 km (63,6 %) relèvent de routes d'accès ou de raccordement existant déjà dans le secteur depuis plus de 30 ans. Les 57,4 km restants (35,9 %) constituent une nouvelle voie de circulation visant à relier les routes existant le long de la frontière entre le Costa Rica et le Nicaragua à proximité immédiate du fleuve San Juan.

L'étude a été planifiée conformément aux conditions fixées par la loi du Costa Rica en la matière, qui reconnaît que ce type d'étude est l'outil le plus adapté à une évaluation environnementale des travaux déjà réalisés, afin d'établir leurs conditions environnementales et leur impact sur l'environnement et de fixer les mesures nécessaires à l'équilibre environnemental dans un cadre normatif systématique.

Les incidences de la route sur l'environnement sont définies à l'aide de critères scientifiques et techniques, par application d'un instrument juridique national qui contribue à la définition de politiques publiques dans la zone d'intervention environnementale du projet.

La méthodologie prévoyait une étude complète des autres travaux de recherche menés dans la région par le CCT et de travaux menés par d'autres chercheurs et institutions renommés, telles les universités publiques. De surcroît, des relevés ont pu être effectués sur le terrain grâce à cinq visites sur site de plusieurs jours et à un survol d'observation de la zone du projet. Il a été possible d'obtenir des informations concernant les zones protégées de la région, ainsi que des données issues du projet mené par le CCT sur l'ara de Buffon, des images satellites et des photographies aériennes, entre autres.

Le diagnostic de l'impact sur l'environnement a été effectué conformément aux exigences légales décrites dans le «Guide technique relatif aux diagnostics de l'impact sur l'environnement» rédigé par le secrétariat technique national à l'environnement (SETENA) du ministère de

l'environnement (MINAE) par la voie de la résolution n° 2572-2009 du 2 novembre 2009. Quatre mois ont été consacrés à la rédaction du volet écologique de l'étude et ce processus a été consigné de façon détaillée dans une vidéo présentant l'état actuel de la route. L'étude a porté sur le tronçon commençant à un point appelé borne II à proximité de Las Tiricias de Cutris à San Carlos, jusqu'à Delta Costa Rica, à l'endroit où les fleuves Colorado et San Juan se séparent.

La présente étude présente toutefois une limite en ce qu'il n'a pas été possible d'analyser le contexte plus général de la zone étudiée, le Gouvernement du Nicaragua n'ayant pas autorisé les chercheurs responsables de l'étude à pénétrer sur la partie nicaraguayenne du fleuve San Juan. Pour cette raison, il n'a pas été possible d'effectuer des échantillonnages et des analyses dans le fleuve San Juan, en particulier dans les embouchures des fleuves et des chenaux qui s'y déversent.

L'étude décrit de façon concrète les aspects généraux du projet : emplacement géographique, définition de la zone du projet et des zones d'influence, description générale des activités, risques et système de contrôle des risques environnementaux.

Plusieurs parties de l'étude proposent une description détaillée de l'environnement, à savoir une description et un inventaire des conditions physiques et biologiques particulières (aquatiques et terrestres) de la zone étudiée.

Vient ensuite une rubrique consacrée au «diagnostic environnemental», dans laquelle les impacts et les risques pour l'environnement sont identifiés et caractérisés, ainsi que les activités susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement, ce qui conduit à leur évaluation et à la préconisation de mesures correctives. L'étude intègre également une matrice d'importance des impacts du projet, qui identifie 11 impacts spécifiques, dont 8 sont considérés comme non pertinents et 3 comme modérés au regard de la méthodologie officielle du SETENA. Par ailleurs, sur toute la longueur de la route (159,7 km), 5 sources de risques pour l'environnement ont été identifiées et requièrent la mise en place de mesures de prévention et d'atténuation.

Partie intégrante du diagnostic de l'impact sur l'environnement, un «plan d'adéquation environnementale» est préconisé : il est constitué d'une matrice intégrant la dimension environnementale, les impacts identifiés, les mesures correctives ou compensatoires, les objectifs environnementaux, les indicateurs de performance environnementale, l'emplacement et la fréquence des échantillonnages à effectuer, l'interprétation et les remontées d'information demandées, ainsi que l'organisation responsable de la mise en œuvre de ces dispositions.

Enfin, l'étude se termine par une série de conclusions et de recommandations, qui visent à faciliter la mise en application des résultats de l'étude au chantier de construction et partant, à améliorer la qualité de vie des habitants et des écosystèmes de la région étudiée.

## **2. Introduction**

### **2.1. Contexte**

Dans le contexte du différend qui oppose le Costa Rica et le Nicaragua suite aux actions menées par le Nicaragua sur le territoire costa-ricien d'Isla Portillos en novembre 2010, entre autres, le Gouvernement du Costa Rica a lancé, en vertu d'un décret d'urgence nationale, une série de travaux sur son territoire, parmi lesquels la construction d'une route le long de la frontière nord, appelée route 1856 ou route Juan Rafael Mora Porras.

En réponse aux allégations du Gouvernement du Nicaragua concernant de prétendus impacts sur son territoire de la construction de la route 1856, le ministère des affaires étrangères a convoqué un comité technique national et international, en vue de procéder à une évaluation exhaustive des

conditions environnementales le long de la route et des impacts potentiels de la construction pour l'environnement.

Afin de mener à bien l'analyse environnementale du projet de route 1856, le ministère a fait appel aux services du Centre de sciences tropicales, compte tenu de sa réputation, de son expertise technique sur le sujet et de ses quelque 20 ans d'expérience en matière de recherche dans la région, pour réaliser un diagnostic de l'impact sur l'environnement, et notamment son volet écologique.

A cette fin, le CCT a rencontré les membres de l'équipe technique, constituée de représentants du ministère des affaires étrangères, de la régie costaricienne d'électricité, du ministère de l'environnement et de l'énergie et d'autres conseillers gouvernementaux.

En vertu de la législation en vigueur au Costa Rica, les diagnostics de l'impact sur l'environnement constituent un excellent outil d'évaluation de l'environnement pour les activités et travaux déjà menés et ont pour objectif de définir, à l'aide d'un cadre organisationnel systématique, les mesures nécessaires à l'équilibre environnemental.

## **2.2. Champ d'application de l'étude**

Le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement a pour objet d'établir l'incidence environnementale du projet de route 1856 d'après des critères scientifiques et de mettre au point un instrument d'aide à la définition de politiques publiques concernant l'incidence du projet sur l'environnement.

Ce diagnostic a pour objet d'organiser et de planifier, dans un cadre unique, les mesures techniques et environnementales qui ont été, peuvent être et doivent être mises en place à l'avenir concernant ce projet.

## **2.3. Objectifs**

### **2.3.1. Objectif général**

Rédiger le volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement sur le fondement de l'analyse et des recommandations établies suite aux recherches effectuées sur le terrain et à l'examen de preuves documentaires concernant les impacts potentiels sur l'environnement physique et biologique de la zone du projet de route 1856. Cet objectif a été atteint grâce à l'identification et à l'évaluation de mesures environnementales correctives mises en place pendant la construction, ainsi que de mesures qui s'appliqueront à court et moyen terme, afin de garantir la viabilité environnementale du projet.

### **2.3.2. Objectifs spécifiques**

- Rédiger une description générale de l'environnement physique de la zone étudiée, où se situe la route 1856.
- Collecter et harmoniser les informations relatives aux écosystèmes de la région, et en particulier de la zone située entre la borne II et le site Delta 7 (Delta Costa Rica).
- Effectuer des analyses qualitatives et quantitatives des impacts potentiels sur l'environnement des activités de construction liées à la route 1856.



— Fournir au Gouvernement du Costa Rica des éléments techniques et scientifiques d'aide à la décision eu égard au tracé et à la construction de la route 1856.

## 2.4. Méthodologie

Pour ce qui est des méthodes utilisées pour la rédaction du volet écologique, il a été procédé à une revue bibliographique des études et travaux de recherches précédemment menés par des membres ou partenaires du CCT dans la région, ainsi qu'à cinq visites de terrain par des professionnels de l'équipe et à un survol d'observation. Ces activités avaient toutes pour but de valider certains aspects de la caractérisation des écosystèmes locaux et des facteurs environnementaux sur lesquels les travaux de la route 1856 étaient susceptibles d'avoir un impact.

Malgré des informations biologiques limitées concernant la zone, les travaux antérieurs et les 15 années d'expérience des experts Guisselle Monge et Olivier Chassot, dans le cadre du programme Lapa Verde mené par le CCT dans la zone de construction de la route, ont permis de vérifier et d'harmoniser les informations relevées sur le terrain. De même, l'expérience de plusieurs consultants dans des champs scientifiques divers se rapportant au projet a été prise en compte dans la rédaction du volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement (voir pièce jointe 9.1).

Afin de rassembler les informations nécessaires à la caractérisation du couvert végétal et des écosystèmes présents dans la zone, différentes études ont été analysées. Bien que certaines d'entre elles reconnaissent l'existence de différentes associations végétales ou écosystèmes dans la zone frontalière, il n'a pas été possible de trouver une carte permettant de caractériser et de différencier ces systèmes sur l'ensemble de la route 1856. Seules quelques zones restreintes ont pu être identifiées. C'est la raison pour laquelle les informations dont on dispose à ce sujet sont partielles : en effet, l'accès aux forêts et aux zones humides du secteur était auparavant extrêmement difficile. Pour autant, certaines des informations qui identifient ces étendues de terre vierge concernent des secteurs importants, à partir du territoire frontalier du fleuve San Juan et sur plusieurs dizaines de kilomètres dans l'intérieur des terres.

Les cartes nationales du couvert forestier fournissent des informations quantitatives, mais n'établissent pas les associations végétales en tant que telles. De même, il existe des cartes des zones protégées dans le secteur étudié ; il est possible de localiser certains écosystèmes bien visibles tels que les zones humides, mais pas sur l'ensemble de la zone étudiée, en raison du tracé géographique de la route.

Afin d'établir les associations végétales prédominantes le long de la route 1856, des photographies aériennes ont été analysées pour opérer une distinction entre les différents types de végétation, puis une vérification a été effectuée sur le terrain afin d'affiner la classification. Ces travaux ont permis d'établir la présence de forêts primaires et secondaires, ainsi que leur emplacement et leur état géomorphologique général. En outre, l'utilisation d'une carte générale des talus a permis de différencier deux états topographiques et deux types distincts et remarquables d'associations forestières le long de la route 1856.

Les zones humides situées dans les zones d'influence directe du projet figurent également sur la carte susmentionnée. Ces zones humides abritent différents types d'associations végétales. La carte du couvert végétal a permis de quantifier la superficie de chaque type de végétation.

Pour ce qui est de la caractérisation et de la description de la faune aquatique de la région, l'analyse effectuée a porté sur des espèces identifiées dans le cadre de précédentes études (manuels, rapports techniques, thèses et articles scientifiques).

Pour ce qui est des relevés effectués sur le terrain, dix formations aquatiques situées le long de la route 1856 ont été sélectionnées afin d'étudier et d'identifier l'abondance de la communauté des macroinvertébrés aquatiques et la richesse des taxons, mais également d'évaluer la qualité de l'eau à l'aide du score BMWP-CR. Les macroinvertébrés en question ont été choisis comme bioindicateurs de la qualité de l'habitat aquatique. Les critères retenus pour le choix des sites d'échantillonnage ont été les suivants :

- Emplacement géographique
- Utilisation des sols
- Type de couvert végétal
- Accès, taille et profondeur
- Type de veine de courant
- Disponibilité des substrats

Priorité a été donnée aux zones dans lesquelles il a été jugé probable que les travaux de construction de la route 1856 aient eu des impacts sur l'environnement. La plupart des sites concernés correspondaient à des zones présentant des talus profonds et instables et des remblais non consolidés, comme c'est le cas, par exemple, de la zone située entre le fleuve Infiernito et le site de Boca San Carlos sur la rivière San Carlos.

Enfin, la structure et les lignes directrices de la présente étude sont conformes aux dispositions du Guide technique relatif aux diagnostics de l'impact sur l'environnement rédigé par le secrétariat technique national à l'environnement (SETENA) du MINAE, au titre de la résolution n° 2572-2009—SETENA du 2 novembre 2009.

Ce document indique que le diagnostic de l'impact sur l'environnement est un outil d'évaluation environnementale proche d'une étude de l'impact sur l'environnement, fondé non sur des prévisions, mais sur des échantillonnages et des mesures effectués par une équipe d'évaluation concernant «une activité, des travaux ou un projet déjà réalisés et en fonctionnement, qui ne bénéficient pas encore d'un permis environnemental, mais pour lesquels le propriétaire (promoteur) souhaite obtenir pareil permis».

Conformément à la résolution susmentionnée, le diagnostic de l'impact sur l'environnement vise les objectifs techniques suivants :

1. Identifier et quantifier les impacts et risques environnementaux qu'une activité ou un projet spécifique peuvent avoir pour l'environnement et la population.
2. Définir et établir les mesures nécessaires afin d'éliminer, de prévenir, d'atténuer ou de compenser les impacts importants. A cette fin, le diagnostic doit proposer un plan d'adéquation environnementale, ainsi qu'un programme de prévention des situations d'urgence et des accidents, dans les cas définis par les autorités.

Le SETENA précise en outre que le diagnostic de l'impact sur l'environnement porte uniquement sur les impacts négatifs importants, son objectif étant de les éliminer, les prévenir, les atténuer ou les contrebalancer. A cette fin, les impacts opérationnels sont évalués grâce à des outils de métrologie et des mesures environnementales sont prises pour les éliminer, les prévenir, les atténuer ou les contrebalancer, dans le respect d'un équilibre financier ne menaçant pas l'activité qui fait l'objet de l'évaluation.

## **2.5. Calendrier des activités du volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement**

La rédaction du présent volet écologique a commencé après la signature d'un contrat entre le ministère des affaires étrangères du Costa Rica et le Centre de sciences tropicales le 22 mai 2013. D'un commun accord entre les parties, le CCT a défini une période de 4 mois pour la rédaction du volet écologique et la réalisation d'une vidéo de l'état actuel de la route 1856. A cette fin, les ressources bibliographiques disponibles ont fait l'objet d'une analyse. En outre, des visites sur site et des survols aériens de la zone du projet ont été réalisés, ainsi qu'une visite du fleuve San Juan par les professionnels de l'équipe chargée de l'étude.

## **2.6. Cahier des charges**

Les analyses effectuées dans le cadre du volet écologique de l'évaluation de la route 1856 se fondent sur les lignes directrices environnementales fixées par le ministère de l'environnement et de l'énergie du Costa Rica (MINAE), conformément à la résolution ministérielle n° 2572-2009—SETENA et au décret exécutif n° 32966—MINAE, dont l'une des annexes est le Guide technique relatif aux diagnostics de l'impact sur l'environnement. Le présent diagnostic est également conforme aux modalités et procédures en vigueur au Costa Rica concernant l'évaluation des projets envisagés, ainsi que des projets en cours.

Les analyses en question ont principalement porté sur la route 1856, dont la construction a débuté pendant la période 2011-2012. Néanmoins, la présente évaluation porte uniquement sur la zone située entre la borne II et le site dit Delta 7 (ou Delta Costa Rica), c'est-à-dire le tronçon de la route 1856 situé le long du fleuve San Juan jusqu'au point où celui-ci donne naissance au fleuve Colorado.

Le présent volet écologique du diagnostic de l'impact sur l'environnement s'inscrit dans une série de rapports techniques rédigés par différentes institutions costa-riciennes, dans le cadre d'une démarche interdisciplinaire visant à l'amélioration du tracé de la route et des travaux de construction.

Bien que l'étude suive la trame recommandée par les lignes directrices établies en vertu de la législation costa-ricienne pour la rédaction de ce type de diagnostic, deux analyses complémentaires ont été menées afin d'en élargir la portée. Le premier rapport est une «évaluation de l'impact de la construction de la route 1856 sur le développement des activités touristiques sur le fleuve San Juan» (voir pièce jointe 9.2). Le second rapport est une analyse de la connectivité structurelle du paysage de la route 1856 (voir pièce jointe 9.3). Compte tenu de la localisation stratégique de la route à la frontière entre le Costa Rica et le Nicaragua, il importe tout particulièrement de procéder à une analyse des impacts potentiels sur la conservation de la connectivité, en se fondant sur l'identification des sites prioritaires et des liaisons essentielles à la connectivité.

## **2.7. Limites**

Les résultats et évaluations présentés ici se limitent au seul tronçon de la route 1856 allant de la borne II, à proximité du site de Tiricias de Cutris de San Carlos, jusqu'à Delta Costa Rica, au-delà de la bifurcation des fleuves Colorado et San Juan.

Il importe de noter qu'il n'a pas été possible d'analyser les résultats de la présente étude dans le contexte plus général de la zone étudiée, le Gouvernement du Nicaragua n'ayant pas autorisé l'équipe scientifique à se rendre sur le fleuve San Juan. Pour cette raison, il n'a pas été possible d'effectuer des échantillonnages et des analyses dans le fleuve San Juan, en particulier dans les

embouchures des fleuves et des chenaux qui s'y déversent et qui figurent pourtant dans la présente étude.

.....

## **7. Conclusions et recommandations**

### **7.1. Conclusions**

1. Le projet de route 1856 consiste en la construction d'une route non asphaltée, partant de la localité de San Jeronimo de Los Chiles jusqu'au site dit Delta 7 (mieux connu localement sous le nom de Delta Costa Rica). La route 1856 s'étend sur 159,7 km. Environ 63 % du tracé de la route (101,5 km) est constitué de routes et de chemins d'accès qui existent depuis plus de 30 ans. Les 35,9 % restants (57,4 km) correspondent à des routes nouvelles, créées afin de raccorder les routes existantes. Toutefois, la présente étude porte uniquement sur la portion du tracé de la route parallèle au fleuve San Juan, d'une longueur de 108,2 km.

2. Dans le cadre de la construction de la route, comme tel est souvent le cas dans ce type de projet, il a été nécessaire de procéder à de nombreux travaux secondaires. Ainsi, il a fallu dégager le terrain, construire des talus, installer des conduits et des canalisations, mais également poser les fondations de la route et de la surface de roulage.

3. Les aspects environnementaux liés aux activités de construction étaient les suivants :

- a. Dégagement des terres et de la végétation sur certains tronçons du tracé de la route : cette activité a entraîné l'élimination du couvert végétal le long des tronçons de la route où il n'existait auparavant aucune voie de circulation.
- b. Mouvements de terrain, formation de talus et remblais : ces phénomènes ont pu conduire à une instabilité des talus à certains points où ceux-ci sont particulièrement escarpés. Augmentation du ruissellement des eaux de surface, apport de sédiments à certaines des formations aquatiques situées à proximité et altération du paysage situé le long de la route.
- c. Installation de systèmes de drainage et de ponts temporels : ce facteur pourrait avoir contribué à l'altération des écosystèmes aquatiques à des endroits spécifiques et à la modification des systèmes naturels de drainage dans la zone.
- d. Installation de remblais, des couches de base et de la surface de roulage de la route : cette activité pourrait avoir contribué à la sédimentation de certaines des formations aquatiques situées à proximité de la route.

#### **7.1.1. Biologie terrestre**

1. Dans la zone étudiée, deux biozones ont été identifiées : une forêt de transition terrière prémontagneuse très humide et une forêt tropicale très humide. La forêt tropicale très humide est la biozone la plus présente dans le nord du Costa Rica et représente jusqu'à 61 % du territoire des plaines de Sarapiquí et San Carlos. Cette biozone est celle qui fournit le principal habitat de liaison entre le bassin hydrographique nicaraguayen de l'Atlantique sud et la chaîne volcanique centrale du Costa Rica.

2. Dans la zone du projet, différents écosystèmes ou associations végétales ont été identifiés, parmi lesquels les associations de forêts (forêts primaires et secondaires altérées), les systèmes de zones humides, les systèmes riverains et les associations de palmiers yolillo.
3. Au cours des dernières décennies et en raison du développement des terres agricoles, nombre des écosystèmes de forêts primaires situés dans la zone frontalière ont été altérés et/ou détruits, pour ensuite devenir des forêts naturelles. Ces forêts présentent malgré tout une grande diversité floristique.
4. Pour ce qui est des systèmes de zones humides, le secteur compte un grand nombre de fleuves, de cours d'eau, de chenaux et de lagunes dans lesquels la végétation est caractéristique des zones humides lacustres et palustres.
5. La zone du projet a été évaluée à 10 475 hectares, d'après l'interprétation de photographies aériennes prises avant et après la construction de la route. Toutefois, le projet de route n'a concerné que 4 921,3 hectares, soit 47 % de la superficie totale.
6. Cette évaluation de la végétation présente le long de la route a permis d'établir les chiffres suivants : le dégagement du terrain sur lequel la route a été construite a nécessité l'abattage de quelque 14,9 hectares de forêts secondaires et l'altération de 68,3 hectares de forêts primaires, représentant respectivement 4,2 % et 19,5 % de la superficie altérée du tracé de la route.
7. En outre, 2,3 hectares ne relevant pas de forêts, mais de systèmes de zones humides, ont été altérés. On a pu constater sur le terrain que la route a été construite en majeure partie dans des zones découvertes non boisées. L'abattage de forêts s'est toutefois avéré nécessaire dans les zones où aucun terrain découvert n'existait pour y construire la route.

#### **7.1.2. Biologie aquatique**

1. Afin d'évaluer l'incidence la construction de la route 1856 sur les écosystèmes aquatiques présents le long de la route et se déversant dans le fleuve San Juan, dix formations aquatiques lotiques (ruisseaux permanents, chenaux, rivières) ont été sélectionnées : la structure des communautés y a été caractérisée et la qualité de l'eau évaluée à l'aide du score BMWP (MINAE-S, 2007), les groupes de macroinvertébrés aquatiques étant retenus comme espèce bioindicatrice.
2. Pour chacune des formations aquatiques, deux points d'échantillonnage ont été définis, l'un en amont (sans influence directe) à l'intersection de la route et de la formation aquatique concernée, et l'autre en aval (sous influence directe), ce qui représente 20 points d'échantillonnage au total.
3. De façon générale, la communauté aquatique de la plupart des sites échantillonnés présentait une diversité et une richesse de taxons très faible. Ce résultat peut s'expliquer par trois raisons : le débit, la turbidité et la sédimentation, et le type de substrat.
4. A partir des valeurs d'abondance et de richesse de taxons obtenues pour les sites ne subissant aucune influence (en amont de la route) et les sites sous influence (en aval de la route), dans la moitié des cas, il a été possible de conclure que les bioindicateurs ne fournissaient pas d'informations évidentes laissant croire à un impact sur la communauté des macroinvertébrés, les valeurs étant trop variables.
5. Ce résultat pourrait s'expliquer par deux facteurs : 1) une dégradation de la qualité de l'habitat en raison de certaines des activités menées dans le cadre de la construction de la route, telles que les mouvements de terrain et l'abattage de la végétation fluviale et 2) des processus de



sédimentation dans les rivières en raison de l'instabilité des talus et des remblais, qui s'érodent à cause des précipitations.

6. Une fois altéré, un environnement aquatique est soumis à des périodes de recolonisation pouvant aller de quelques jours à plusieurs semaines ou mois, en fonction de la nature et de l'ampleur de l'altération. La réaction des bioindicateurs aux effets de la construction de la route 1856 sur les écosystèmes aquatiques a été imperceptible dans certains sites d'échantillonnage, peut-être parce que les communautés aquatiques s'étaient déjà reconstituées.
7. Les échantillonnages sur site ont été effectués environ un an et demi après les travaux de construction de la route et il est probable que, pendant cette période, les communautés soient parvenues à se stabiliser. Il convient également de tenir compte de ce que les formations aquatiques dont il est question se situent dans des zones en contrebas et que le bassin hydrographique situé plus haut y déverse de grandes quantités de sédiments tout au long de l'année : la faune aquatique a donc dû s'adapter à recevoir des quantités importantes de sédiments dans l'eau.
8. La quantité de sédiments charriée par la route n'est pas suffisante pour avoir une incidence significative sur les bioindicateurs étudiés sur les sites d'échantillonnage.
9. La présence de groupes sensibles aux altérations de l'habitat aquatique est un signe intéressant ; en effet, ces indicateurs ont tendance à disparaître en cas d'altérations majeures de l'habitat aquatique, en particulier lorsque leurs effets se prolongent dans le temps, puisque celles-ci ne permettent pas aux taxons sensibles de recoloniser les formations aquatiques. La présence de pareils groupes sensibles dans la quasi-totalité des sites d'échantillonnage, en amont et en aval de la route, peut être interprétée comme un signe positif de reconstitution et comme un impact mineur de la construction sur les conditions environnementales des sites étudiés. Seuls deux sites ont enregistré une absence de macroinvertébrés considérés comme sensibles.
10. Il faut également tenir compte de ce que les échantillonnages de bioindicateurs ont été effectués dans des rivières qui se déversent dans le fleuve San Juan : les effets ainsi repérés des travaux de construction de la route sur l'environnement aquatique, tel que la modification des substrats et la sédimentation, sont donc des événements localisés.
11. Ces formations aquatiques ont subi l'influence directe des travaux de construction ; par conséquent, les résultats ainsi obtenus ne peuvent être transposés au fleuve San Juan, ce cours d'eau étant d'un niveau supérieur et présentant un volume d'eau bien plus élevé que celui constaté sur les sites d'échantillonnage. La partie du fleuve San Juan parallèle à la route se situe sur le versant inférieur du bassin hydrographique, où la quantité de sédiments est naturellement élevée. Il semblerait donc que les impacts de la construction de la route sur les organismes vivants dans le fleuve San Juan aient été minimaux et très diffus, si l'on tient compte du débit du fleuve, en tant que formation réceptrice.
12. Afin de répondre avec une plus grande certitude à la question de savoir si les travaux de construction de la route ont conduit à un niveau de sédimentation susceptible d'avoir une incidence sur la faune aquatique du fleuve San Juan et les affluents de la zone étudiée, il est dans un premier temps nécessaire d'établir et de valider les seuils de sédimentation risquant d'affecter les espèces vivant dans ces cours d'eau, puisqu'il n'existe aucune information concernant les organismes aquatiques de la zone étudiée.
13. Il faut également établir et valider les seuils de mortalité et de morbidité des espèces vivant dans ces rivières, ainsi que leur degré de tolérance à la sédimentation, afin d'évaluer si la construction de la route 1856 a effectivement eu une incidence sur la faune aquatique du fleuve San Juan, pour la même raison que celle indiquée au paragraphe précédent. Pour calculer ces valeurs, il faudrait procéder à des analyses périodiques sur le long terme évaluant la tolérance

des espèces et des macroinvertébrés à différents types de sédiments, afin d'établir à quel moment les organismes aquatiques commencent à mourir ou présentent une réduction conséquente de leur abondance et de leur diversité.

### **7.1.3. Tourisme**

1. La zone étudiée n'est pas du tout propice à un développement touristique et n'a d'ailleurs jamais fait l'objet de projets de pareille nature. A ce jour, le secteur situé entre la borne II et Delta Costa Rica ne dispose d'aucune installation touristique, que ce soit sur la rive gauche ou sur la rive droite du fleuve San Juan. Le seul site proposant des services et des installations est celui de Delta Cabins, principalement destiné aux visiteurs nationaux. A mesure que l'on s'approche des zones situées aux extrémités du fleuve, les infrastructures et les installations se font plus présentes, principalement dans les villes de San Carlos et San Juan del Norte.
2. Il importe de noter que les axes touristiques se concentrent sur les extrémités du fleuve. Le Nicaragua met ainsi des services à disposition à San Carlos et aux alentours, ainsi qu'à Greytown, San Juan et ses environs. Le reste du fleuve, principalement la zone étudiée, ne dispose d'aucun service à l'exception des transports fluviaux d'un site à l'autre. Les services touristiques dans la zone étudiée sont extrêmement limités et ne représentent que 3,54 % de l'activité touristique nationale (PNDTS 2011-2020). Le département où se trouve le fleuve San Juan est l'un des plus pauvres du pays et, par conséquent, l'une des régions proposant le moins de services touristiques.
3. La ville de San Carlos est le point de ralliement des touristes visitant la zone du fleuve San Juan (El Castillo, Sábalo, îles Solentiname), mais ne peut leur offrir les infrastructures physiques permettant de répondre à leurs besoins. La zone compte à peine 10 000 visiteurs par an, un nombre trop faible pour envisager d'y développer un tourisme solide et concurrentiel.
4. Certains hébergements touristiques disposant d'installations de catégorie intermédiaire, bien intégrés à l'environnement naturel, se développent actuellement à destination des visiteurs étrangers intéressés par l'écotourisme : observation de la faune, visites des réserves, sentiers naturels spécifiques, pêche, etc. Pour autant, certaines de ces installations ne parviennent pas à attirer suffisamment de visiteurs pour atteindre l'équilibre financier et ne sont donc ouvertes que de façon saisonnière, et non à l'année.
5. Les services touristiques concernent principalement l'observation de la nature, les randonnées en pleine nature, les excursions en bateau et la pêche. Ces activités se concentrent à Sábalo, à El Castillo, dans la réserve biologique de Indio-Maíz et dans les zones avoisinantes.
6. Malgré de nombreuses possibilités de pêche sportive dans la région de San Carlos et dans les villes avoisinantes, telles que El Castillo et Sábalo, aucune activité commerciale ou piscicole n'a été identifiée le long du fleuve dans la zone étudiée. Les activités de pêche entre la borne II et Delta Costa Rica sont sporadiques et relèvent de la pêche de subsistance.
7. La région dispose d'un potentiel touristique suffisant pour attirer des visiteurs étrangers. Toutefois, les infrastructures, l'état des routes d'accès, les services et produits proposés, la qualité de l'offre existante, la mauvaise image de la région et les mécanismes d'information et de commercialisation qui n'en sont qu'à leurs balbutiements ne permettent pas pour le moment d'attirer davantage de touristes.
8. Tous ces facteurs, ainsi que le climat d'instabilité et d'insécurité qui règne dans la région, alimenté par les échos des différends frontaliers permanents entre le Costa Rica et le Nicaragua, n'encouragent aucunement le type d'investissement privé qui serait susceptible de développer le tourisme dans le secteur.

9. D'ailleurs, le Nicaragua (PNDTIS 2011-2020) fait résolument du département du fleuve San Juan l'une des destinations prioritaires pour le renforcement et le développement de l'écotourisme dans le pays. A ce jour, on ne constate pourtant aucune évolution significative du nombre de visiteurs. Dans certains cas, on observe même le phénomène contraire, à savoir un fort recul du nombre de touristes déclaré (voir tableau 1).
10. L'augmentation du nombre de visiteurs à San Carlos risque de se poursuivre, à un rythme moindre toutefois, grâce à la nouvelle route reliant Managua à San Carlos, qui réduit le temps de trajet à 4 heures et 30 minutes. Toutefois, ce nouvel accès semble attirer principalement les touristes locaux et les routards.
11. Grâce au transport fluvial, les touristes ont principalement recours à des services publics de transport proposant des itinéraires préétablis et des tarifs très accessibles (voir pièce jointe 1). Les services de transport privés sont par ailleurs onéreux et quasi inexistants.
12. Les touristes qui visitent la région, et en particulier ceux qui traversent le fleuve San Juan, sont généralement des routards, qui souhaitent déboursier le minimum d'argent pour des services extrêmement basiques.
13. A ce jour, la navigation sur le fleuve nécessite de nouveaux investissements en raison des taxes supplémentaires que les bateaux costa-riciens doivent acquitter lorsqu'ils se présentent aux autorités nicaraguayennes à San Carlos, mais également des exigences très strictes imposées aux touristes, qui viennent s'ajouter au sentiment d'insécurité et de méfiance envers ceux qui s'efforcent de développer un tourisme organisé.
14. La construction de la route 1856 n'a eu aucun impact direct sur le tourisme au cours des dernières années.

#### **7.1.4. Connectivité écologique**

1. L'analyse de la structure du paysage de la région fait ressortir certains écarts en matière d'objectifs de conservation de la biodiversité et des écosystèmes dans le bassin hydrographique du Costa Rica. Par ailleurs, certains éléments révèlent un environnement dynamique et hétérogène susceptible d'avoir une incidence sur les processus d'adaptation écologique, de succession, de maintien de la diversité des espèces, de stabilité de la communauté, de concurrence entre les espèces, d'interactions entre les prédateurs et les proies, de parasitisme, d'épidémies et d'autres événements stochastiques.
2. L'identification des voies et des zones importantes de connectivité dans le paysage de la zone étudiée démontre que celles-ci n'ont pas de lien avec le tracé de la route, bien que cette route d'accès à la frontière se trouve dans le secteur le plus boisé de la zone étudiée. De même, on peut affirmer que, compte tenu de la faible superficie des systèmes naturels affectés, la route n'a pas eu d'impact conséquent sur la connectivité structurelle du paysage de la zone étudiée.

#### **7.1.5. Impacts identifiés**

1. Sur le fondement de l'évaluation des activités menées dans le cadre du projet, une série d'impacts a été identifiée et est présentée ci-après :
  - a. Abattage des forêts sur l'emprise du chantier de la route et des zones avoisinantes
  - b. Sédimentation partielle des abords des zones humides à proximité de la route

- c. Disparition d'arbres et de buissons situés en marge des formations aquatiques, en raison des inondations
  - d. Glissements de terrain et érosion de talus affectant le côté boisé de la route
  - e. Altération des écosystèmes des zones humides (drainage et remblais)
  - f. Altération de la connectivité structurelle
  - g. Altération possible de l'habitat aquatique
  - h. Altération possible des microhabitats et des substrats des macroinvertébrés aquatiques en raison du remplissage des espaces interstitiels par des sédiments
  - i. Diminution possible de l'abondance et de la richesse des taxons
  - j. Impact potentiel sur la qualité de l'eau en raison de la turbidité
  - k. Altération du paysage due à la construction
2. En tenant compte des résultats de l'évaluation de la matrice d'importance des impacts sur l'environnement, seuls 8 impacts non pertinents et 3 impacts modérés ont été identifiés. Ils présentent des caractéristiques très particulières, notamment les suivantes :
- a. Aucun des impacts n'est récurrent sur la totalité de la longueur de la route. Ils ont été établis à des points très précis du chantier.
  - b. Tous les impacts présentent une intensité faible ou moyenne sur l'environnement.
  - c. Tous les impacts ont une valeur uniforme, entre 20 et 34, ce qui indique une incidence faible et homogène des impacts le long de la route.

## **7.2. Recommandations**

Plusieurs recommandations, déjà examinées dans la présente étude, figurent ci-après. Elles sont présentées ici sous forme résumée et préconisent la mise en œuvre de plusieurs activités dans le cadre de mesures de prévention, d'atténuation et d'amélioration des conditions environnementales dans la zone du tracé de la route 1856.

1. Renforcer les plans de reboisement existants par le plantage d'arbres dans les secteurs où il n'est pas nécessaire de remplacer les arbres abattus en raison de la route et favoriser le reboisement à l'aide d'espèces d'essence locale rares, menacées ou endémiques, en évitant les arbres exotiques ou les espèces qui ne sont pas présentes localement. Il est recommandé de mélanger les espèces afin de simuler la diversité forestière et de faire en sorte que les espèces choisies comptent environ 50 % d'espèces communes à la zone et actuellement décimées, telles que le manú, le cocobolo et le jícaro. Les 50 % restants doivent inclure des espèces habituellement plantées dans le cadre des plans de reboisement de la zone. Les sites présentant des talus modérément ou fortement ondulés et se trouvant sur la rive frontalière du fleuve San Juan et sur d'autres rivières ou ruisseaux permanents dans la zone de la route 1856 doivent être considérés comme prioritaires.
2. Permettre la régénération naturelle de la végétation secondaire lorsqu'elle apparaît de façon spontanée, ne pas l'abattre pour planter des arbres et ne pas utiliser d'espèces arboricoles pour faire de l'ombre et ainsi favoriser le développement d'espèces intolérantes au soleil ou qui poussent mieux à l'ombre en début de croissance, telles que le manú, le pinillo ou l'amandier de

montagne, par exemple. Sur les sites présentant des talus très inclinés, il est recommandé de permettre la réinstallation de la végétation secondaire, dans la mesure du possible. La perte totale du couvert forestier naturel ayant été estimée à 83 hectares, il conviendrait d'autoriser la reconstitution d'une végétation secondaire naturelle dans une zone d'une superficie équivalente à celle de la zone déboisée. Cette zone pourrait se situer dans un secteur proche de la route, en donnant la priorité aux zones vallonnées adjacentes au fleuve San Juan, afin de contrebalancer l'écosystème autochtone, les programmes de reboisement étant généralement peu propices aux écosystèmes nécessaires au maintien de la biodiversité autochtone du site. Afin de s'assurer de l'existence d'espèces d'arbres menacées sur l'emprise du chantier, il est recommandé de dresser un inventaire des espèces forestières existant le long de la route.

3. Etablir un plan intégré d'utilisation des sols dans la région.
4. Etablir un plan de protection et de préservation des arbres identifiés comme étant en danger d'extinction ou interdits.
5. Promouvoir l'identification de différents types de paysage et écosystèmes le long de la route, afin de favoriser le tourisme.
6. Etablir un plan de protection et de préservation des arbres identifiés comme étant en danger d'extinction ou interdits.
7. Procéder à l'enlèvement de tous les sédiments accumulés afin de permettre l'écoulement normal de l'eau par les systèmes naturels de drainage.
8. Lorsque la route passe à proximité d'une zone humide, comme c'est le cas de la lagune de Remolinito Grande, éviter l'obstruction de l'écoulement naturel des eaux et permettre leur libre circulation par des canalisations ou d'autres moyens, de sorte que les eaux qui pénètrent normalement dans la zone humide puissent s'écouler sans entrave des deux côtés de la route.
9. Améliorer les structures de drainage et les remblais afin d'éviter l'altération des zones humides.
10. Poursuivre les travaux de protection des surfaces des talus par l'application de géotextiles et l'amélioration des angles de talus et des systèmes de drainage.
11. Favoriser le bon écoulement des eaux sur les sites mentionnés, par l'installation d'un système de drainage adapté ou l'abaissement du niveau des canalisations afin d'éviter l'accumulation des eaux et l'altération de la route proprement dite. Une fois l'eau excédentaire évacuée, il est conseillé de permettre simplement à la zone de se reconstituer naturellement par régénération secondaire de la végétation autochtone.
12. Evaluer la faisabilité technique d'une modification du tracé de la route au niveau d'Infiernillo afin de suivre le tracé des routes locales déjà construites, en le déviant de quelques kilomètres vers le sud, où se trouvent des hameaux et des espaces découverts présentant des conditions topographiques plus favorables à un projet de cette nature.
13. Etablir un plan de suivi le long de la route afin de s'assurer de la reconstitution des zones humides et d'empêcher l'abattage des arbres par la population locale, mais également l'incursion de squatteurs dans les zones situées à proximité de la route.
14. Poursuivre le reboisement à l'aide d'espèces autochtones à la région.
15. Promouvoir la régénération naturelle et la reconstitution écologique afin d'améliorer la connectivité entre les espèces, les communautés et les populations.
16. Etablir un plan de suivi le long de la route afin de s'assurer de la reprise de la connectivité.



17. Eviter l'emploi de ciment dans le lit des rivières et cours d'eau en dessous des conduits d'évacuation et des ponts.
18. Mettre en œuvre un plan de suivi des conditions de l'habitat aquatique dans les cours d'eau situés en contrebas des systèmes de drainage et des ponts, assurer un suivi des substrats des cours d'eau concernés et prendre les mesures qui s'imposent.
19. Renforcer les travaux de stabilisation des talus dans les meilleurs délais, en particulier pour ce qui est des talus considérés comme instables, afin d'éviter la sédimentation des environnements aquatiques.
20. Poursuivre la mise en œuvre des activités de reboisement à l'aide d'espèces autochtones.
21. Promouvoir la régénération naturelle et la reconstitution écologique des rives des cours d'eau.
22. Etablir un plan de suivi le long de la route 1856 afin de s'assurer de l'état des substrats des cours d'eau concernés par la présente étude.
23. Renforcer le couvert végétal de la zone afin de le protéger et de venir à bout de pratiques historiquement préjudiciables en matière d'utilisation des sols, antérieures à la construction de la route 1856, en particulier dans les secteurs proches de la rive du fleuve San Juan, en veillant à ce qu'à l'avenir, la population respecte l'état de la rive du fleuve.
24. Même si les efforts de reboisement mis en œuvre par la CODEFORSA respectent l'emploi d'espèces propres à la région, il est recommandé de réfléchir à l'emploi d'espèces à croissance rapide, afin de limiter les impacts visuels à court terme. Dans le cadre du reboisement, il est également conseillé d'avoir recours à des espèces capables de recouvrir des espaces verticaux suffisamment importants pour servir d'obstacles visuels, d'une hauteur de 60 cm minimum.
25. Il est essentiel à ce processus que la reconstitution du paysage s'inscrive pleinement dans une démarche de participation des communautés locales. A cette fin, il est donc recommandé de mettre en place des initiatives telles que des programmes d'éducation à l'environnement, d'éducation civique, de soutien à l'entrepreneuriat et de développement personnel, entre autres. Le but n'est pas seulement de reboiser la zone, mais également, dans cette région plus que dans n'importe quelle autre, de démontrer l'engagement sans équivoque du pays en faveur du développement durable, dans le cadre d'une démarche intégrée et visionnaire.
26. Générer des perspectives de développement pour les communautés locales par la mise en place de politiques favorables au tourisme local. Cette démarche pourrait à son tour favoriser le tourisme vers le Nicaragua, ce qui était l'intention de départ.
27. Améliorer les conditions de sécurité pour les habitants et les touristes de la région.

.....

---