

Développement d'un modèle spatialisé représentant les interactions entre les rivières naturelles, les réseaux d'irrigation et de drainage et les estuaires.

1 Introduction

Ce travail est lié au projet de recherche "Développement et gestion des plaines inondables dans un contexte de changement global", qui est lié à l'accord de coopération spécifique entre l'Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), l'entreprise de service public (ESPOL-TECH E.P.) et Agronomes et Vétérinaires Sans Frontières (AVSF).

AVSF est l'exécutant en Equateur du projet COSTEA, qui vise à produire des connaissances à des fins appliquées dans le bassin du fleuve Daule, permettant de penser les aménagements hydro-agricoles de manière intégrée et raisonnée en fonction d'objectifs multiples. Par conséquent, cette étude de cas se concentre sur l'axe thématique #2 du présent accord : Caractérisation hydro(géo)logique et hydraulique des plaines inondables.

Les effets des inondations ont provoqué diverses perturbations dans l'écosystème naturel et dans les zones patrimoniales du monde entier, comme les sites protégés par l'UNESCO (56 % des sites touchés). (Arrighi, 2021). En général, la périodicité des inondations entraîne des problèmes environnementaux et socio-économiques pour la population, en raison d'événements extrêmes tels que les fortes pluies et les inondations. (Dhote et al., 2018) en raison d'événements extrêmes tels que les fortes pluies de mousson, le débordement des rivières et des ruisseaux, les inondations, les crues et les glissements de terrain. (Pradhan & Youssef, 2011) inondation, débordement des rivières dans un bassin donné (Ali et al., 2022; Hromadka et al., 1988) par l'élévation du niveau de la mer et l'affaissement des sols, entre autres. (Yin et al., 2019) parmi d'autres.

Les inondations causées par les débordements des rivières sont un sujet d'étude qui a conduit à la génération de modèles pour comprendre leur hydrodynamique et pour analyser le risque d'inondation dans les zones basses des bassins fluviaux. (Chen et al., 2014; Tanaka et al., 2017). A l'heure actuelle, les connaissances sur l'hydrodynamique de la Daule se limitent à la mise en œuvre de divers ouvrages de captage et de dérivation. Les informations sont dispersées dans un grand nombre d'institutions et de sources, qui réalisent des études variées avec des approches différentes, ce qui profite au chercheur en lui fournissant une base de données large et diversifiée, bien que dans certains cas d'accès difficile. (CIPAT-ESPOL et al., 2014; Kazakis et al., 2016; Koutsouris & Lyon, 2018; Rivero Solórzano, 2014; Rushton, 2007; Sanz et al., 2011; van Vliet et al., 2017). Néanmoins, ce que l'on en sait est utile pour l'élaboration d'un projet qui cherche à évaluer l'interaction hydrodynamique entre le fleuve et ses berges.

Pour la mise en œuvre de ce projet dans la génération du modèle hydrodynamique bidimensionnel, l'utilisation du logiciel HECRAS est un moyen par lequel l'objectif peut être atteint pour compléter, permettant d'analyser les différentes conditions d'écoulement à la suite du débordement de la rivière. (Dasallas et al., 2019; Marimin et al., 2018; Syafri et al., 2020). Cet outil génère des simulations sous différentes perspectives et approches (telles que l'hydrologie et l'hydrodynamique), pour l'évaluation de l'aléa et du risque d'inondation dans les zones habitées. (Bezák et al., 2018; Farooq et al., 2019; Jamali et al., 2019; Zeleňáková et al., 2019). Par conséquent, une compilation des informations existantes et pertinentes est envisagée, en particulier les données proches de la zone d'intérêt.

La mise en œuvre d'une simulation bidimensionnelle est nécessaire pour deux raisons. Tout d'abord, les connaissances actuelles sur la rivière Daule et ses affluents en termes d'hydrodynamique sont très limitées. Deuxièmement, la dynamique des crues de ces rivières par rapport à leurs plaines, estuaires, affluents et zones potentielles d'irrigation et de drainage

agricole est très active, malgré le fait que la rivière Daule et d'autres cours d'eau soient partiellement régulés depuis un certain temps (barrage de Daule Peripa, transfert de DauVin, entre autres). Ces structures interviennent directement et indirectement dans la quantité d'eau qui s'écoule dans la zone d'étude.

La génération de ce modèle offrira également la possibilité d'étudier les éventuelles zones tampons. En réduisant ainsi l'impact de ces phénomènes naturels sur les zones urbaines situées dans le secteur et les secteurs en aval, on obtient un bénéfice social et économique pour le sous-bassin influencé par ces rivières.

Un autre avantage offert par cette modélisation est son adaptabilité à toute zone ou sous-bassin d'intérêt, et sous certaines conditions de données indispensables qui seront connues dans cette étude. Il s'agit d'une zone pilote qui offrira une connaissance opportune de l'hydrodynamique de ses rivières et des simulations permettant de comprendre les différentes circonstances d'inondation auxquelles sont soumis les habitants de ce secteur.

Grâce à ce modèle, le processus de prise de décision des gestionnaires du sous-bassin et des parties prenantes peut être réalisé par la simulation de différentes options ou décisions visibles dans ce travail. Cela permettra d'observer les avantages influencés par les améliorations de l'utilisation des terres, l'anticipation des inondations et la planification optimale de l'eau, qui favorisent les avantages clés à atteindre avec le soutien d'une modélisation hydrodynamique adéquate.

2 Cible

Développer un modèle hydrodynamique spatial basé sur des paramètres hydrométéorologiques et des données spatiales entre les rivières Macul, Bobo, Pula et les zones humides environnantes, pour l'établissement et la connaissance des zones appropriées comme zones tampons, qui serviront de captage ou de stockage d'eau en cas de fortes précipitations et d'inondations dans la partie inférieure du sous-bassin, évitant ainsi des pertes économiques dans le secteur et des vies humaines.

3 Lieu d'étude

La recherche se situe dans le sous-bassin de la rivière Daule, plus précisément dans le secteur du canton de Palestina appartenant à la province de Guayas. Située dans la partie centrale de la province, entre de grandes extensions de terres de cultures de riz et d'activités d'élevage, elle présente un relief topographique très bas, ce qui la rend très sujette aux inondations, qui bloquent les routes, détruisent les cultures et le travail de ceux qui y vivent.

De plus, les rivières qui interviennent dans le secteur sont la rivière Macul et la rivière Pula (Figure 1, annexes), qui sont principalement influencées par les précipitations (locales et en amont) et par les ouvrages hydrauliques en amont (barrage de Daule-Peripa, Daule-Vinces et Baba), provoquant le débordement des rivières et des inondations dans les plaines entourant ces zones. Pendant la saison hivernale ou en cas de fortes pluies, le débit de la rivière Pula change considérablement, débordant et inondant les zones proches du lit de la rivière. Cette rivière est fortement influencée par la rivière Macul, qui apporte des volumes considérables pendant la saison hivernale. Cette situation est influencée par la présence de zones humides en amont.

Afin d'obtenir un résultat plus conforme aux besoins du projet et dans les zones d'intérêt, il a été décidé de réaliser l'étude le long du cours de deux rivières (la rivière Pula et la rivière Macul), qui sont proches de la rivière Daule (Figure 1). En outre, sur la base de la visite effectuée précédemment avec les membres de l'AVSF (novembre 2021), il a été conclu que le meilleur endroit pour l'étude dans le cadre du développement du modèle hydrodynamique se trouve dans

le secteur de Palestina, le long du cours de la rivière Pula, en amont et en aval de la confluence avec la rivière Macul (figure 1, autour du point P1).



Figure 1. Localisation de la zone d'étude et des points d'intérêt visités.

4 Méthodologie et outils mis en œuvre

La méthodologie appliquée a été réalisée en plusieurs phases, présentées ci-dessous :

4.1 Phase I : Reconnaissance sur le terrain des sites d'intérêt.

Au cours de cette phase, des sorties sur le terrain ont été effectuées aux points d'intérêt possibles, afin d'observer et de reconnaître un maximum de trois sections de la rivière (d'environ 6 km chacune, figure 1 en annexes). Cela implique la reconnaissance des zones les plus sujettes aux inondations, l'utilisation et le type de sol, sa disponibilité pour être sans doute, entre autres.

Avant les sorties sur le terrain et les survols de drones le long des lits des rivières d'intérêt, les emplacements idéaux pour les survols ont été déterminés. Différents équipements ont été utilisés, tels que le drone de CADS, le GPS différentiel de CIPAT et l'utilisation de poudre de craie pour marquer les points de contrôle ou de calibration pour le traitement des images (Figure 2, annexes).

4.2 Phase II : Analyse des données et traitement de l'information.

Le présent travail s'est concentré sur deux types d'informations :

- Informations primaires. - Il s'agit de données in situ, telles que les données bathymétriques et la photogrammétrie par drone. Ces données ont été utiles pour le traitement des données dans le domaine de la télédétection et la génération de la géométrie des canaux de rivière.

- Informations secondaires. - Cette étude a été réalisée par le biais d'une analyse documentaire et de sources externes pour la collecte de données, notamment les suivantes :
 - Topographie - Modèle numérique d'élévation (MNE, résolution 3 m).
 - Données météorologiques et hydrologiques (précipitations - débits, INAMHI).
 - Utilisation des sols - Zones inondables.
 - Type de sol - informations géospatiales (NASA)
 - Barrages et transfert d'eau (Registres)

Pour la section d'échantillonnage, une campagne de collecte directe de données a été exécutée, principalement dans :

- Orthophotos. - Il s'agit d'un échantillonnage à distance obtenu au moyen d'un drone. Des survols ont été effectués le long des rivières (Figure 1, annexes), le nombre de vols dépendant des dimensions des rivières et des plaines, ce qui a permis d'obtenir des informations utiles pour la construction du MNE et l'exploration des données.

Les données générées au cours des 2 phases ont fourni des informations solides pour commencer la construction du modèle, dont l'une des activités est la génération des conditions aux limites. Les images obtenues à l'aide du drone sont saisies dans le logiciel Agisoft Metashape. Ainsi, un nuage de points a été obtenu à partir de toutes les images géoréférencées avec les points de contrôle établis sur le terrain (Figure 3, annexes). Ensuite, un TIN (triangle irrégulier réseau) a été généré dans ArcMap pour corriger l'interpolation spatiale. De cette manière, il a été possible d'obtenir un modèle numérique d'élévation (MNE).

Les MNE traités à partir des survols effectués avec le drone génèrent des informations à l'échelle centimétrique des lits des rivières Macul et Pula. Cependant, afin de compléter la topographie dans ses contours (précisément pour le cas des inondations lors d'événements extrêmes), un MNE du programme SIGAGRO (du MAG) à l'échelle 3x3 m a été utilisé (Figure 4 en annexes, MNE final à l'échelle 1 m). Les deux MNE (provenant des orthophotos et de SIGAGRO) ont été unifiés au moyen d'une mosaïque.

Avant l'utilisation de Hec-Ras et la simulation des crues, la géométrie a été générée sur tout le cours des rivières Macul et Pula, au moyen de l'axe, des *lignes de rive* et des *chemins d'écoulement*. Elles sont essentielles pour la préparation ultérieure des profils en travers, la délimitation des zones d'inondation et des zones de stockage ou des *zones de stockage* (de plusieurs existantes) qui contribuent au lit de la rivière avec de l'eau stockée pendant la saison des pluies (Figure 5, annexes). En outre, grâce à des visites sur le terrain, il a été possible de déterminer le nombre de Manning pour chacune des sections de l'ensemble du canal d'étude (plaines et canal ; entre 0,054 et 0,110), conformément au guide établi par l'USGS, United States Geological Survey, (Arcement & Schneider, 1989). Ces sections ont été attribuées le long de la rivière Macul et Pula (Figure 6, annexes).

4.3 Phase III : Génération du modèle hydrodynamique.

A ce stade, le modèle hydrodynamique (Figure 7, annexes) a été préparé à l'aide du logiciel Hec-Ras et des données et informations recueillies lors des phases précédentes, permettant de simuler l'environnement actuel (baseline) au plus près de la réalité.

Les informations susmentionnées, telles que la géométrie du canal d'étude, ont été saisies dans le logiciel Hec-Ras en format vectoriel (shapefile) (Figure 8, annexes). Dans le cas des zones d'accumulation de volume (stockage), les données d'élévation-volume tabulées obtenues à partir d'ArcMap ont été saisies. De plus, à partir des sections transversales saisies dans le logiciel, nous avons procédé à la vérification du raccordement des points sur tout l'axe d'étude et à la

saisie des coefficients de rugosité préalablement déterminés pour chaque section (Figure 9, annexes).

Afin de générer les contraintes de charge hydraulique, un hydrogramme synthétique a été généré, dont la valeur maximale était celle associée à la période de retour de conception (100 ans). Cet hydrogramme a été saisi comme condition limite en amont. En aval, la pente du fond (*profondeur normale*) a été utilisée.

En outre, des zones tampons (zones de stockage) ont été incluses sur les berges, sur la base d'images satellites de la plateforme Google Earth Engine. Cela met en évidence les zones inondables dans ce secteur (figure 10, annexes). Ces zones de stockage sont reliées aux sections transversales et les unes aux autres, assurant ainsi la connectivité et le transport pendant les événements de crue extrêmes (figure 11, annexes).

4.4 Phase IV : Scénarios et options de gestion.

Les résultats des divers scénarios ont été évalués par rapport au scénario de base et, en outre, par rapport aux performances de diverses actions de gestion proposées ou de situations possibles dans le futur. Ainsi, cinq scénarios ont été générés en se concentrant sur : (i) simulation avec la géométrie de base et les données initiales utilisées pour le calibrage pour une période de retour de $T = 2$ ans ; (ii) simulation avec les mêmes données initiales et en incluant les zones de stockage dans la géométrie finale pour $T = 100$ ans ; (iii) mêmes paramètres que le scénario précédent, mais en extrayant ou en restreignant le fonctionnement naturel des zones de stockage ; (iv) simulation avec des flux de période de retour $T = 200$ ans, mais avec les zones de stockage et les paramètres initialement établis ; et (v) même simulation avec des flux de période de retour $T = 200$ ans, mais sans les zones de stockage.

5 Résultats

5.1 Simulation de la base et calibrage du modèle.

La simulation a commencé avec les données de la rivière Macul (géométrie, DEM, coefficients de rugosité, etc.). Dans ce contexte, un débit de retour centennal de $180 \text{ m}^3/\text{s}$ a été estimé à partir des données enregistrées en amont de la rivière Pula. Ceci est dû au fait que la seule station hydrologique disponible est située sur la rivière Pula. En observant les pourcentages de contribution de chaque rivière, il a été possible de les comparer avec les relevés obtenus sur le terrain, et de compléter cela par des consultations avec les habitants concernant les niveaux atteints lors des crues.

Comme ces conditions n'atteignent pas le point de référence indiqué par les agriculteurs et les autres villageois (figure 2), les chiffres de Manning ont été modifiés pour calibrer la simulation. Enfin, avec un débit de $205,2 \text{ m}^3/\text{s}$ et une pente de $1,2\text{‰}$ (1,2 pour mille), il a été possible d'atteindre le niveau signalé lors des événements extrêmes (Figure 3).

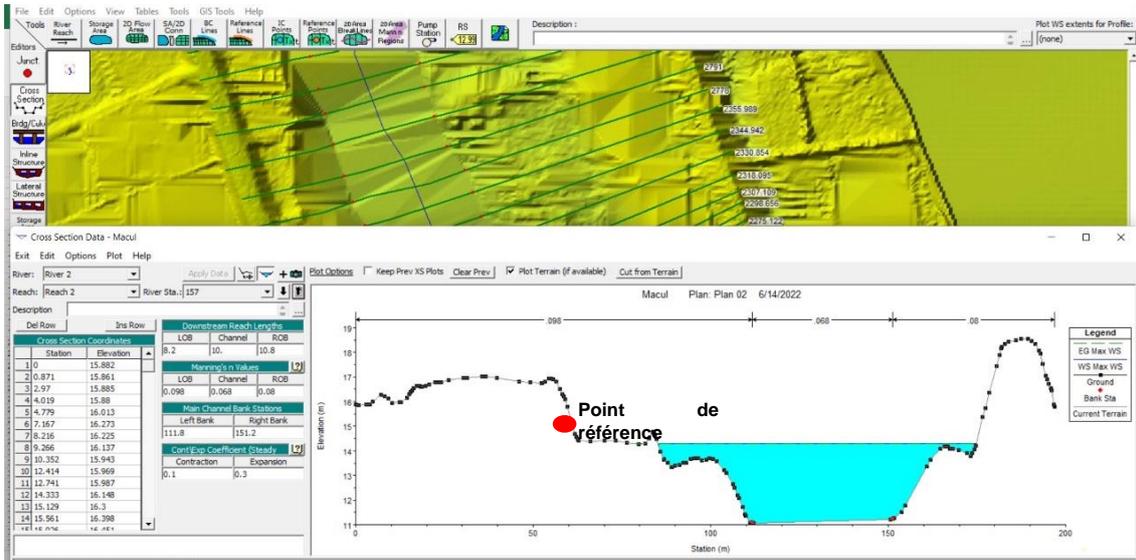


Figure 2 : Point de référence pour le débit de retour centennal.

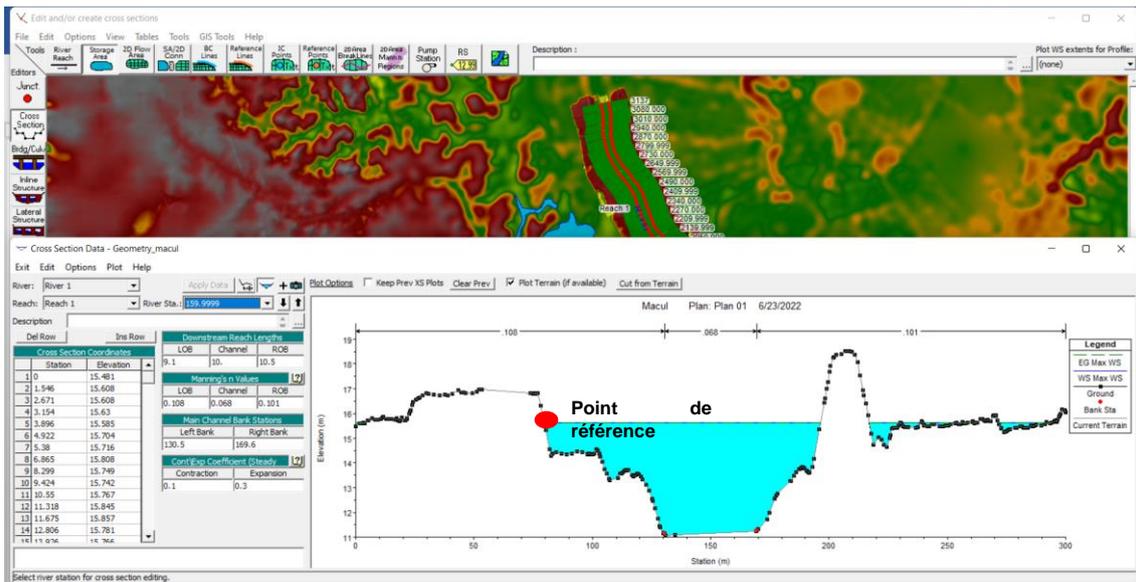


Figure 3. référence atteinte pour un débit de retour centennal de 205,2 m³ /s.

Avec ces conditions établies et l'ensemble des données calibrées, une géométrie finale a été générée comme couche de base pour les simulations de scénario définies ci-dessus (Figure 11, annexes). En outre, les zones de stockage existantes ont été identifiées pour déterminer leur degré d'importance, afin de contraster la quantité de débit qui s'écoulerait dans le canal en l'absence de zones tampons.

4.1 Simulation de scénarios.

Les scénarios simulés, comparés au modèle standard, ont donné des résultats différents, qui sont conformes aux différentes contraintes et critères établis pour chacun d'eux. La figure 4 montre le niveau d'eau de chaque simulation, le numéro 1 étant celui qui a la plus grande probabilité d'occurrence (T = 2 ans) et, par conséquent, le niveau que l'eau atteint couramment

au cours d'une année hydrologique donnée. Cette section a été corroborée sur le terrain sur la base de l'expérience des villageois et des marques d'inondation constatées année après année.

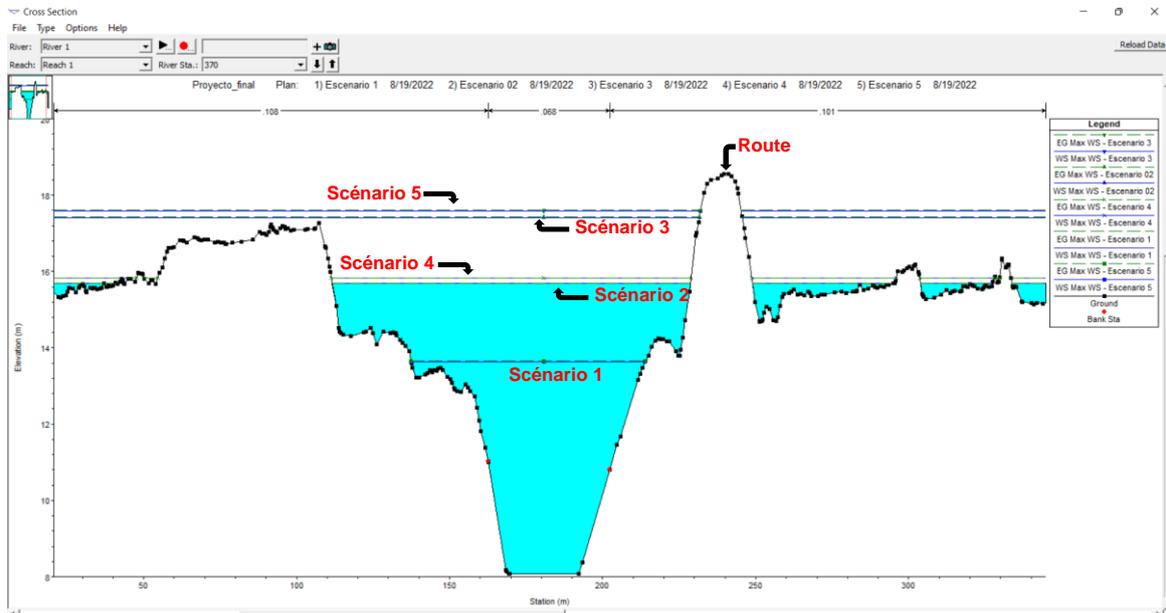


Figure 4 : Représentations graphiques de l'atteinte du niveau d'eau maximal dans les cinq scénarios.

A première vue, cette figure montre que le scénario 5 est celui dans lequel une hausse considérable se produit, compte tenu du fait qu'il s'agit d'un événement de très faible probabilité, mais de forte intensité ($T = 200$ ans), et qu'il manque de zones de stockage (Figure 10, annexes). Pour cette raison, il serait proche de dépasser la pente de la route dans cette section de l'analyse. Cependant, dans les scénarios 2 et 4, bien qu'une élévation considérable soit observée (au-dessus des plaines), elle n'est pas aussi importante que dans le cas 5 ou 3, car il existe des zones de stockage qui ont pour fonction de contenir les excès.

Cependant, en analysant en amont dans le Macul, il existe des tronçons où la rivière déborde de la route en raison de la topographie de ce secteur (Figure 12, annexes), inondant plusieurs zones où l'eau est observée sur le côté droit de la route. L'étendue de chaque scénario est présentée dans le tableau 1, qui indique la zone touchée et une description des résultats pour chacune des simulations effectuées.

Les scénarios 2 et 3 sont simulés avec les mêmes paramètres (débit et période de retour) et la même géométrie de canal (sections transversales et n de Manning), la seule différence étant la présence des zones de stockage (Tableau 1).

En réduisant ou en éliminant complètement ces zones par un confinement latéral du canal, plus de 80% des secteurs inondés sont évités. Cependant, cela entraînerait des inondations en aval (élévation des niveaux au-delà de ce que l'on connaît actuellement). Cette situation peut se produire si les zones de basse altitude sont converties en rizières ou utilisées pour d'autres cultures.

L'un des effets de la restriction des zones de stockage est la modification ou l'augmentation des niveaux d'eau, qui se produit dans chaque section de rivière (mesurée par rapport au niveau de la mer).

L'eau est ainsi montée de près de 2 mètres dans le scénario 2, contrairement au premier scénario, dégradant la stabilité des pentes près de la route, ce qui pourrait compromettre la route sur

laquelle des centaines de personnes circulent chaque jour. En ce sens, les vitesses élevées associées (à $T = 100$ ans) provoqueraient un effet érosif qui dévasterait les structures anthropiques situées en aval (maisons, ponts, etc.). Cet effet est le plus préjudiciable étant donné son augmentation de 60 % et 76 % (respectivement au centre et aux extrémités du canal de la rivière).

Il en va de même pour les scénarios 3 et 5, où au lieu d'utiliser $T = 100$ ans, on prend en compte $T = 200$ ans, ce qui correspond à un degré élevé d'El Niño (voir tableau 1). Son effet est plus sensible qu'auparavant, compte tenu de l'augmentation du débit et de la surface affectée (environ 30000 m² et 68000 m² de plus qu'auparavant, respectivement avec et sans zones de stockage), ce qui traduit un impact considérable sur les interlits du lit de la rivière.

En revanche, la première simulation (scénario 1) prévoit un scénario avec des paramètres hydrologiques faibles en raison de sa périodicité de 50 % de probabilité d'occurrence chaque année, c'est-à-dire très fréquente.

Les effets de la restriction ou de la privatisation des zones inondables se reflètent dans les parties basses de la zone de simulation (partie sud de la rivière Pula, figure 1 - annexes), où les eaux des rivières Macul et Pula se rencontrent (en amont).

Tableau 1. Résumé des scénarios simulés et des critères établis.

		Scénario 1	Scénario #2	Scénario #3	Scénario n°4	Scénario #5
Débit [m³ /s]	Macul	106 m ³ /s	205,2 m ³ /s	205,2 m ³ /s	238,2 m ³ /s	238,2 m ³ /s
	Pula (en amont)	198,9 m ³ /s	385,1 m ³ /s	385,1 m ³ /s	418,1 m ³ /s	418,1 m ³ /s
Période de retour [T = # années].		2 ans	100 ans	100 ans	200 ans	200 ans
Présence de zones de stockage		Ne se déduit pas en raison du faible débit	Oui	Non	Oui	Non
Zone inondée [m²]		914,645.28 m ²	10,122,566.30 m ²	1,939,242.42 m ²	10,190,931.76 m ²	1,968,715.42 m ²
Pourcentage de zones de stockage éliminées [%].		Ne se déduit pas en raison du faible débit	Élimination de 80,9 %.		Élimination de 80,7 %.	
Hauteur maximale de l'eau au-dessus du niveau de la mer [m].		13.80 m	15.65 m	17.62 m	15.80 m	17.80 m
Pourcentage affecté par l'élimination des zones de stockage [%].		Ne se déduit pas en raison du faible débit	Augmentation de 11,1%.		Augmentation de 11,2%.	
Vitesse maximale de l'eau [m/s].	Centre du canal	0,28 m/s	0,18 m/s	0,45 m/s	0,19 m/s	0,46 m/s
	Extrémités des canaux	0,06 m/s	0,04 m/s	0,17 m/s	0,06 m/s	0,18 m/s
Pourcentage affecté par l'élimination des zones de stockage [%].	Centre du canal	Ne se déduit pas en raison du faible débit	Augmentation de 60%.		Augmentation de 60%.	
	Extrémités des canaux		76% d'augmentation		67% d'augmentation	

La figure 5 montre les quatre premières simulations dans lesquelles les zones de stockage ont été utilisées et restreintes. Cela permet de vérifier que les effets provoqués par la fermeture des zones d'inondation influencent directement l'aval, en augmentant drastiquement la valeur de la vitesse de l'eau à environ 3 m/s (Figure 5, en haut à droite et en bas à gauche). Cela affecterait également l'écosystème et les corridors écologiques le long des rivières.

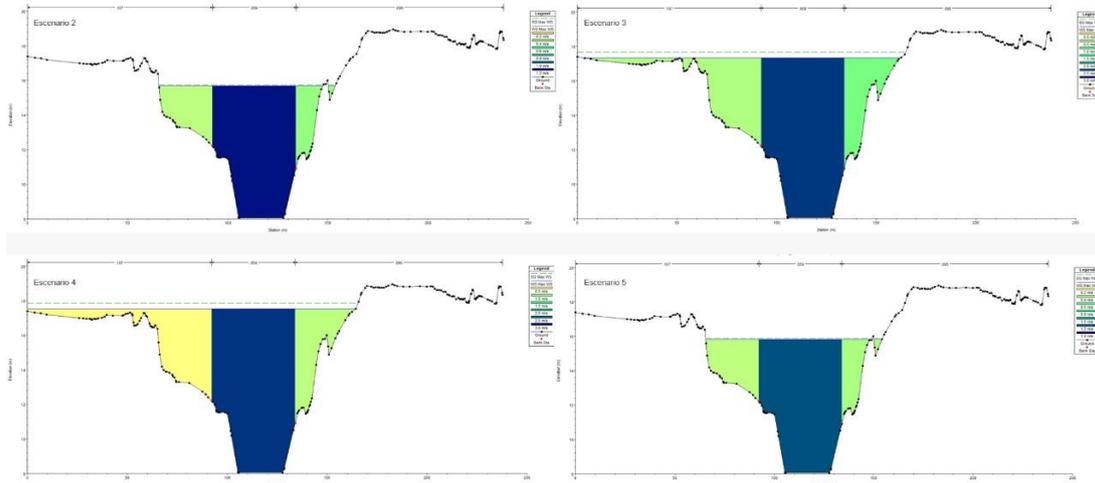


Figure 5 : Représentations graphiques des vitesses maximales atteintes dans les scénarios simulés.

6 Discussion

Le processus de calibration est essentiel pour affiner les critères et la géométrie de base du modèle, ce qui influence directement les résultats des différents scénarios de mise en œuvre d'un projet donné. L'une des méthodes se concentre spécifiquement sur l'altimétrie ou les crues maximales, ce qui permet d'améliorer la précision à chaque point d'échantillonnage et les résultats des scénarios. (Jiang et al., 2019). Par conséquent, le modèle hydrodynamique est calibré sur la base de l'expérience des habitants et des agriculteurs de la zone, où des secteurs spécifiques où le niveau d'eau a été atteint sont reconnus, ce qui permet d'obtenir un niveau de référence pour une période de retour de 100 ans.

Un autre moyen est l'utilisation d'images satellites telles que les cartes de zones inondables (Figure 10, annexes), qui sont utiles pour calibrer le modèle et valider les résultats dans leur forme de base pour une période de retour donnée, comme mentionné dans la littérature. (Dung et al., 2011) y (Dasgupta et al., 2020). Cette méthode s'inscrit dans le cadre de la télédétection qui, en conjonction avec les points de référence déterminés sur le terrain, modifie les paramètres initiaux de la modélisation tels que l'entrée du débit et le coefficient de rugosité "n de Manning". (Ferreira et al., 2021; Mohammadian et al., 2022). Dans le cas présent, grâce à une image satellite obtenue à partir de la plateforme Google Earth Engine (mars 2019), nous avons pu valider le scénario de base (scénario 1) dans lequel une inondation de 1012 hectares a été estimée pour une période de retour de 100 ans.

L'utilisation de zones de stockage reliées aux bords des rivières permet l'accumulation de l'eau qui déborde du lit de la rivière. Ceux-ci sont partiellement ou totalement inondés et diminuent les débits en aval d'un secteur d'étude donné, comme le mentionne l'ouvrage de (Chatterjee et al., 2008). Cependant, en limitant le passage de l'eau vers les zones de stockage, en raison de changements dans l'utilisation des terres (normalement dans le cadre de l'expansion de l'agriculture), il provoque une élévation des niveaux d'eau, ce qui peut compromettre la stabilité des chenaux fluviaux et accroître la vulnérabilité aux inondations dans des zones qui n'étaient pas touchées auparavant (voir figure 12 en annexes). Le modèle hydrodynamique généré par Zeng et al. (Zeng et al., 2018) souligne l'importance de ces zones en tant que solutions naturelles

pour maintenir le contrôle du débit des rivières. Ce système est plus pratique et moins coûteux que les mesures structurelles classiques, par exemple l'utilisation de vannes ou de déversoirs.

En utilisant le logiciel Hec-Ras, comme dans les travaux de Yalcin (2020) et d'Abdella & Mekuanent (2021), il a été possible d'obtenir des données sur différents paramètres impliqués dans les crues des rivières, tels que la profondeur et l'étendue de la crue, la vitesse de l'eau, les temps d'arrivée, etc. On a constaté qu'en aval, il y a un niveau élevé dans des zones qui n'étaient pas inondées auparavant, en raison de l'augmentation du débit associée à des périodes de retour de faible probabilité, par exemple $T = 100$ et 200 ans (scénarios 2 et 4, voir figure 5).

Cependant, avec la suppression des zones de stockage sous ces mêmes débits, ces secteurs seraient radicalement affectés en raison de l'augmentation de la vitesse et du niveau d'eau (passes 3 et 5, voir la figure 5). Ces deux variables peuvent permettre d'analyser le degré ou le niveau d'impact dans une zone donnée, ce qui permet de planifier des programmes d'atténuation des inondations appropriés et rentables. (Salunkhe et al., 2018).

7 Conclusions

La zone d'étude présente une topographie relativement basse, presque uniforme, qui, en moyenne, ne varie pas de plus de 5 mètres en altitude. Par conséquent, pour ce type de modélisation du lit de la rivière, un MNT (modèle numérique de terrain) à l'échelle centimétrique ou métrique (1m) était nécessaire pour mieux déterminer toute la géométrie du lit et des plaines des rivières Macul et Pula. Étant donné que le MNA disponible avec la meilleure résolution spatiale était de 3m, il était essentiel de réaliser la photogrammétrie à l'aide de drones. Cela a permis d'extraire des orthophotos pour les traiter et obtenir un MNA à grande échelle, réussissant à générer de manière adéquate la géométrie du lit de la rivière, comme les sections transversales, la hauteur des berges, la largeur du canal, etc. Un premier modèle numérique d'élévation intégré de la zone a ensuite été généré.

Un modèle hydrodynamique du secteur de confluence des rivières Macul et Pula a été généré pour cette étude. En fonction des points d'échantillonnage ou de la reconnaissance des secteurs inondés par les habitants (hauteurs de référence des zones inondées), les paramètres de modélisation initialement chargés tels que les débits ou les coefficients de rugosité (n de Manning) ont été modifiés. Cela a permis d'estimer des sections avec une rugosité différente due à l'irrégularité du terrain, à la présence de végétation, à l'activité agricole, etc. Une deuxième ressource innovante pour la calibration de la simulation a été l'utilisation d'images satellites, afin de comparer la zone d'inondation modélisée à un événement réel avec une période de retour similaire à celle stipulée.

Les plaines d'inondation jouent un rôle clé en tant que tampon naturel pour l'excès d'eau dans les rivières, également appelé inondation contrôlée. Cela permet de maintenir un faible débit en aval sans endommager les bords du chenal de la rivière, évitant ainsi qu'elle ne déborde dans les zones vulnérables en aval. Cependant, un tel phénomène pourrait se produire en raison de deux menaces : i) l'écoulement d'une période de retour plus élevée que celles simulées ; et, ii) la fermeture ou le changement d'utilisation des terres dans les zones qui servaient auparavant de tampon, et qui dans le futur seraient déconnectées par une structure le long du canal.

Les scénarios 3 et 5 simulent des situations où ces secteurs sont éliminés. Dans un tel contexte, tout le volume initialement contenu est envoyé vers l'aval et, par conséquent, la vitesse de l'eau augmente de plus de 60% et 76%, ce qui entraîne une énergie et une force de contact plus élevées avec les bords du canal. Ceci est dû au fait que les zones de stockage représentent environ 80% des zones touchées. Par conséquent, en limitant sa fonction naturelle de régulateur de crue, le débit qui était stocké devra s'écouler uniquement par le canal et les plaines adjacentes, ce qui entraînera une réduction de la capacité d'acheminement et l'imminence d'une inondation indésirable.

8 Messages clés pour les acteurs publics et privés

Les zones de stockage sont essentielles pour atténuer ou retarder les effets des inondations, car elles retiennent de grands volumes d'eau, empêchant ainsi les rivières de déborder. Leur gestion correcte peut bénéficier à des zones ou des agglomérations situées en aval du secteur d'étude. Par conséquent, ces zones doivent être correctement gérées, par le biais d'ordonnances municipales ou de politiques publiques responsables, et une relation mutuellement bénéfique doit être maintenue, impliquant les propriétaires privés respectifs ou les administrateurs de ces zones inondables. De plus, le maintien de ces zones inondables contrôlées permet le maintien de corridors écologiques pour la faune et la flore du secteur, constituant, en soi, des solutions bleu-vert ou basées sur la nature.

Cette recherche a fourni des informations très pertinentes sur la zone d'étude, qui sont disponibles et sous l'administration d'AVSF et de CADS-ESPOL pour des travaux ultérieurs. Ces données correspondent à des survols des rivières Macul et Pula, ainsi qu'à une petite section où l'eau coule constamment pendant la saison hivernale. Les données photogrammétriques recueillies, comme la topographie à l'échelle centimétrique de ce secteur, peuvent intéresser les différents acteurs publics qui réalisent des travaux le long de ces cours d'eau. L'un d'entre eux correspond à la construction de l'avenue ou de la route de transit et du pont dans cette zone (figure 1 en annexes, lit d'hiver 1 et 2) ; ainsi qu'à la politique publique dans les municipalités environnantes et à la planification de l'eau pour le MAATE (ministère de l'Environnement, de l'Eau et de la Transition écologique).

9 Références

- Abdella, K., & Mekuanent, F. (2021). Application de modèles hydrodynamiques pour la conception de mesures structurelles visant à atténuer les inondations des rivières : le cas de la rivière Kulfo dans le sud de l'Ethiopie. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2779-2791. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01057-5>
- Ali, R. M., Kamran, A., Rubab, S., Sailuj, S. et Sajjad, A. (2022). Modèle hydrodynamique 2D pour l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin inférieur de l'Indus, Pakistan. Dans le *Congrès mondial de l'environnement et des ressources en eau 2018* (pp. 468-482). <https://doi.org/doi:10.1061/9780784481400.044>
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide pour la sélection des coefficients de rugosité de Manning pour les canaux naturels et les plaines inondables*.
- Arrighi, C. (2021). Une analyse à l'échelle mondiale du risque d'inondation des sites du patrimoine mondial de l'UNESCO. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.764459>
- Bezak, N., Šraj, M., Rusjan, S. et Mikoš, M. (2018). Impact de la durée des précipitations et de la distribution temporelle des précipitations définies à l'aide des courbes de Huff sur les résultats de la modélisation hydraulique des inondations. *Géosciences*, 8(2), 69. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>
- Chatterjee, C., Förster, S., & Bronstert, A. (2008). Comparaison de modèles hydrodynamiques de différentes complexités pour modéliser les inondations avec des zones de stockage d'urgence. *Hydrological Processes*, 22(24), 4695-4709. <https://doi.org/10.1002/hyp.7079>
- Chen, Y.-W., Tsai, J.-P., Chang, L.-C., Ho, C.-C. et Chen, Y.-C. (2014). Le développement d'un modèle d'opération d'inondation en temps réel dans le réservoir de Tseng-Wen. *Hydrology Research*, 45(3), 490-503. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.301>
- CIPAT-ESPOL, Agua, S. N. del, & Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (2014). *Processus : Re-Senagua-026-2012 Projet : Elaboration de la carte hydrogéologique à l'échelle 1 : 250 . 000 Rapport final*. 110-121. file:///C:/Users/Wimdowns/10/Downloads/4_MAPA HIDROGEOLOGICO ESPOL.pdf
- Dasallas, L., Kim, Y. et An, H. (2019). Étude de cas de la simulation de couplage HEC-RAS 1D-2D : l'inondation de Baeksan en Corée en 2002. *Eau*, 11(10), 2048. <https://doi.org/10.3390/w11102048>
- Dasgupta, A., Thakur, P. K., & Gupta, P. K. (2020). Potentiel des cartes d'inondation dérivées du SAR pour l'étalonnage des modèles hydrodynamiques dans les régions pauvres en données. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001988](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001988)
- Dhote, P. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Sharma, V. C., Garg, V., Nikam, B. R. et Chouksey, A. (2018). Système expérimental d'alerte précoce des inondations dans certaines parties du bassin du Beas utilisant l'intégration des prévisions météorologiques, des modèles hydrologiques et hydrodynamiques. *Les archives internationales de la photogrammétrie, de la télédétection et des sciences de l'information spatiale*, XLII-5, 221-225. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-221-2018>
- Dung, N. V., Merz, B., Bárdossy, A., Thang, T. D., & Apel, H. (2011). Calibrage automatique multi-objectif de modèles hydrodynamiques utilisant des cartes d'inondation et des données de jauge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(4), 1339-1354. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1339-2011>
- Farooq, M., Shafique, M., et Khattak, M. S. (2019). Évaluation et cartographie des risques d'inondation de la rivière Swat à l'aide du modèle HEC-RAS 2D et du DEM TanDEM-X à haute résolution de 12 m (WorldDEM). *Natural Hazards*, 97(2), 477-492.

<https://doi.org/10.1007/s11069-019-03638-9>

- Ferreira, D. M., Fernandes, C. V. S., Kaviski, E., & Bleninger, T. (2021). Calibrage des modèles hydrodynamiques de rivière : analyse de la composante dynamique des coefficients de rugosité. *Journal of Hydrology*, 598, 126136. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126136>
- Hromadka, T. V., Walker, T. R., & Yen, C. C. (1988). Utilisation du modèle hydrodynamique de diffusion (DHM) pour évaluer les impacts environnementaux des plaines inondables. *Environmental Software*, 3(1), 4-11. [https://doi.org/10.1016/0266-9838\(88\)90003-2](https://doi.org/10.1016/0266-9838(88)90003-2)
- IGM (2013). *Accès ouvert IGM Couches d'information géographique de base*. Cartes topographiques à l'échelle 1:50.000, format Shp. <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/cartografia-de-libre-acceso-escala-50k/>
- INAHMI (2020). *Annuaire météorologiques de l'INAHMI 2012*. Annuaire météorologiques par année : INAHMI. <https://elyex.com/inamhi-anuarios-metereologicos-en-pdf/>
- Jamali, B., Bach, P. M., Cunningham, L., & Deletic, A. (2019). Un modèle d'automates cellulaires pour l'évaluation rapide des inondations (CA-ffé). *Water Resources Research*, 55(6), 4936-4953. <https://doi.org/10.1029/2018WR023679>
- Jiang, L., Madsen, H. et Bauer-Gottwein, P. (2019). Calibrage simultané de plusieurs paramètres de modèles hydrodynamiques à l'aide d'observations altimétriques par satellite de l'élévation de la surface de l'eau dans la rivière Songhua. *Remote Sensing of Environment*, 225, 229-247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.014>
- Kazakis, N., Vargemezis, G., & Voudouris, K. S. (2016). Estimation des paramètres hydrauliques dans un système aquifère poreux complexe à l'aide de méthodes géoélectriques. *Science of The Total Environment*, 550, 742-750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133>
- Koutsouris, A. J., & Lyon, S. W. (2018). Améliorer la compréhension dans des conditions de données limitées : estimation des contributions au débit des cours d'eau dans la vallée de Kilombero, en Tanzanie, qui se développe rapidement. *Hydrological Sciences Journal*, 63(2), 197-209. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1426857>
- Marimin, N. A., Mohammad Razi, M. A., Ahmad, M. A., Adnan, M. S., & Rahmat, S. N. (2018). Modèle hydraulique HEC-RAS pour la zone de la plaine inondable de la rivière Sembrong. *International Journal of Integrated Engineering*, 10(2). <https://doi.org/10.30880/ijie.2018.10.02.029>
- Mohammadian, A., Morse, B., et Robert, J.-L. (2022). Calibration d'un modèle hydrodynamique 3D pour un estuaire hypertidal avec une bathymétrie irrégulière complexe en utilisant une paramétrisation adaptative de la rugosité du fond et de la viscosité tourbillonnaire. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 265, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107655>
- Pradhan, B., & Youssef, A. M. (2011). Cartographie de la susceptibilité à une crue maximale de 100 ans à l'aide de modèles hydrologiques et hydrodynamiques intégrés : couloir de la rivière Kelantan, Malaisie. *Journal of Flood Risk Management*, 4(3), 189-202. <https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01103.x>
- Rivero Solórzano, J. (2014). *Mise à jour de l'étude hydrologique du complexe polyvalent Jaime Roldós Aguilera. Rapport final*.
- Rushton, K. (2007). Représentation dans les modèles régionaux de l'interaction entre la rivière saturée et l'aquifère pour les rivières gagnantes/perdantes. *Journal of Hydrology*, 334(1-2), 262-281. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.008>
- Salunkhe, S. S. S., Rao, S. S., Prabu, I., Raghu Venkataraman, V., Krishna Murthy, Y. V. N., Sadolikar, C., & Deshpande, S. (2018). Modélisation des risques d'inondation à l'aide du modèle hydrodynamique CCHE2D et de données géospatiales pour un scénario de rupture

- de digue du fleuve Brahmapoutre en Assam. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(6), 915-925. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0749-3>
- Sanz, D., Castaño, S., Cassiraga, E., Sahuquillo, A., Gómez-Alday, J. J., Peña, S., & Calera, A. (2011). Modélisation des interactions aquifère-fleuve sous l'influence du captage des eaux souterraines dans le système Mancha Oriental (SE Espagne). *Hydrogeology Journal*, 19(2), 475-487. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0694-x>
- SNI. (2014). *Système d'information national*. Géoportail de l'IEDG. <https://sni.gob.ec>
- Syafri, R. R., Hadi, M. P., & Suprayogi, S. (2020). Modélisation hydrodynamique des inondations de la rivière Juwana à l'aide de HEC-RAS 2D. *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science*, 412, 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012028>
- Tanaka, T., Tachikawa, Y., Ichikawa, Y. et Yorozu, K. (2017). Évaluation de l'impact des inondations en amont sur l'analyse de la fréquence des crues extrêmes par l'intégration d'un modèle d'inondation pour l'évaluation des risques d'inondation. *Journal of Hydrology*, 554, 370-382. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.012>
- van Vliet, M. T. H., Flörke, M., & Wada, Y. (2017). La qualité compte pour la pénurie d'eau. *Nature Geoscience*, 10(11), 800-802. <https://doi.org/10.1038/ngeo3047>
- Yalcin, E. (2020). Évaluation de l'impact des résolutions des données de topographie et de couverture terrestre sur les simulations du modèle hydrodynamique bidimensionnel HEC-RAS pour l'analyse des risques d'inondation en milieu urbain. *Natural Hazards*, 101(3), 995-1017. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03906-z>
- Yin, J., Zhao, Q., Yu, D., Lin, N., Kubanek, J., Ma, G., Liu, M. et Pepe, A. (2019). Modélisation à long terme des risques d'inondation dans les zones côtières à l'aide de mesures InSAR et d'un modèle hydrodynamique : étude de cas de Lingang New City, Shanghai. *Journal of Hydrology*, 571, 593-604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.015>
- Zeleňáková, M., Fijko, R., Labant, S., Weiss, E., Markovič, G., & Weiss, R. (2019). Modélisation du risque d'inondation du ruisseau Slatvinec dans le village de Kružlov, en Slovaquie. *Journal of Cleaner Production*, 212, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.008>
- Zeng, Z., Liang, J., Yang, M., Zeng, Z. et Lang, Y. (2018). Un modèle hydrodynamique couplé à des scénarios multiples pour un réseau de rivières de plaine et son application. *MATEC Web of Conferences*, 246, 01016. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824601016>

10 Annexes

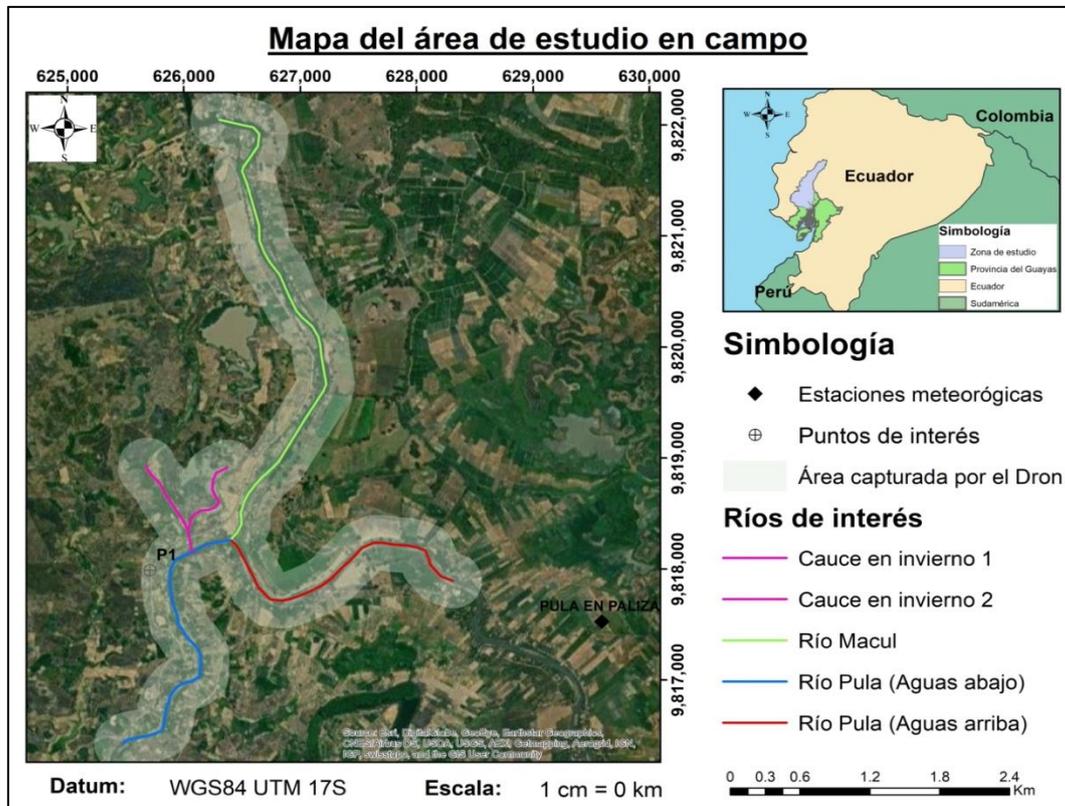


Figure 1. Carte de localisation des rivières d'intérêt et de survol par drone (Palestina - Vinces). Adapté de (IGM, 2013; INAHMI, 2020; SNI, 2014).



Figure 2 : Voyage sur le terrain le long des rivières Macul et Pula du site d'intérêt.

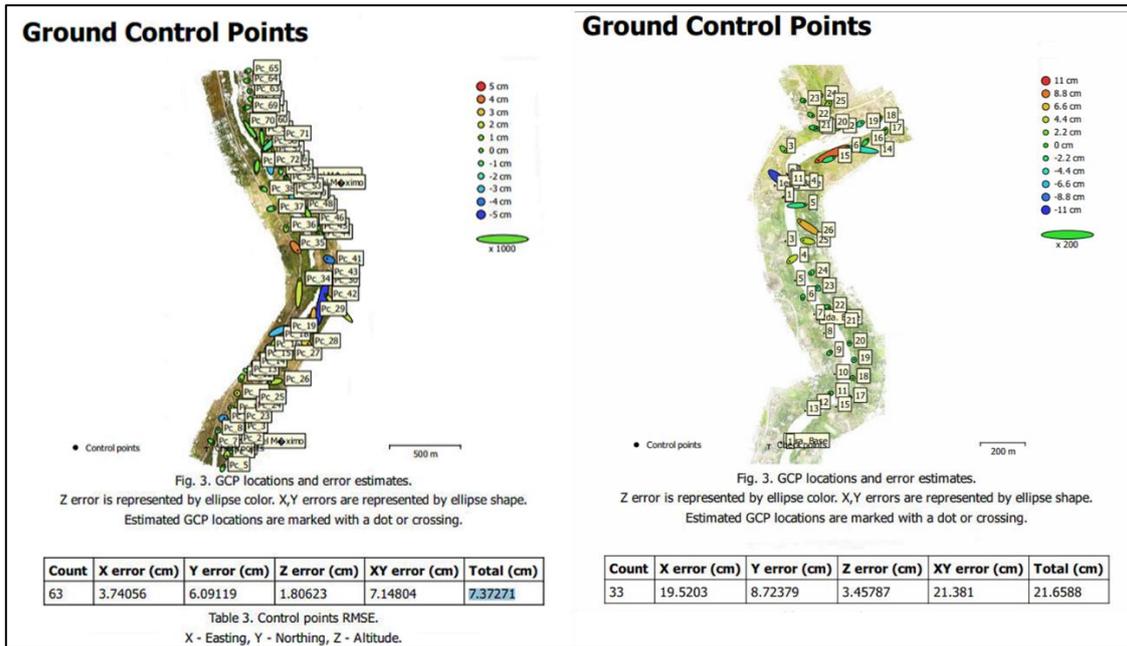


Figure 3. Nuage de points et géoréférencement dans Agisoft à partir de points de contrôle.

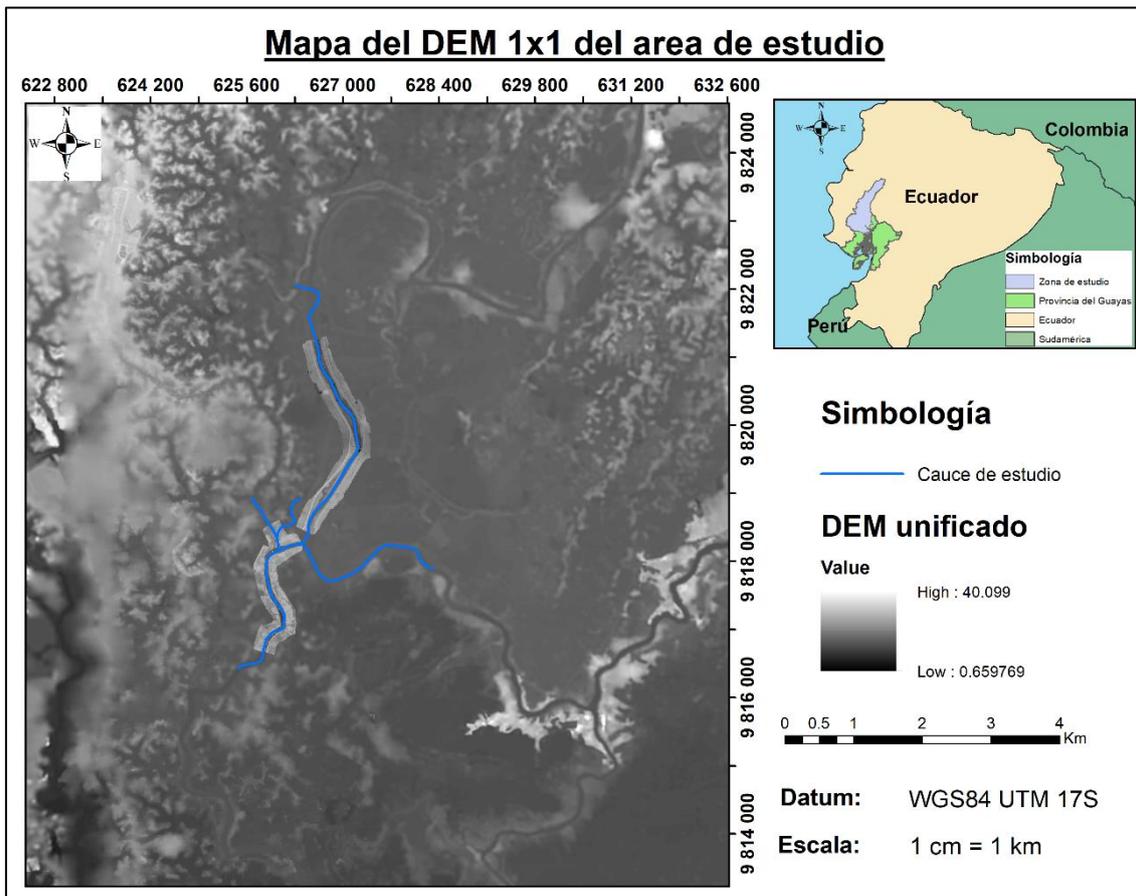


Figure 4 : MNT final à l'échelle 1m de la zone d'étude pour les simulations Hec-Ras.

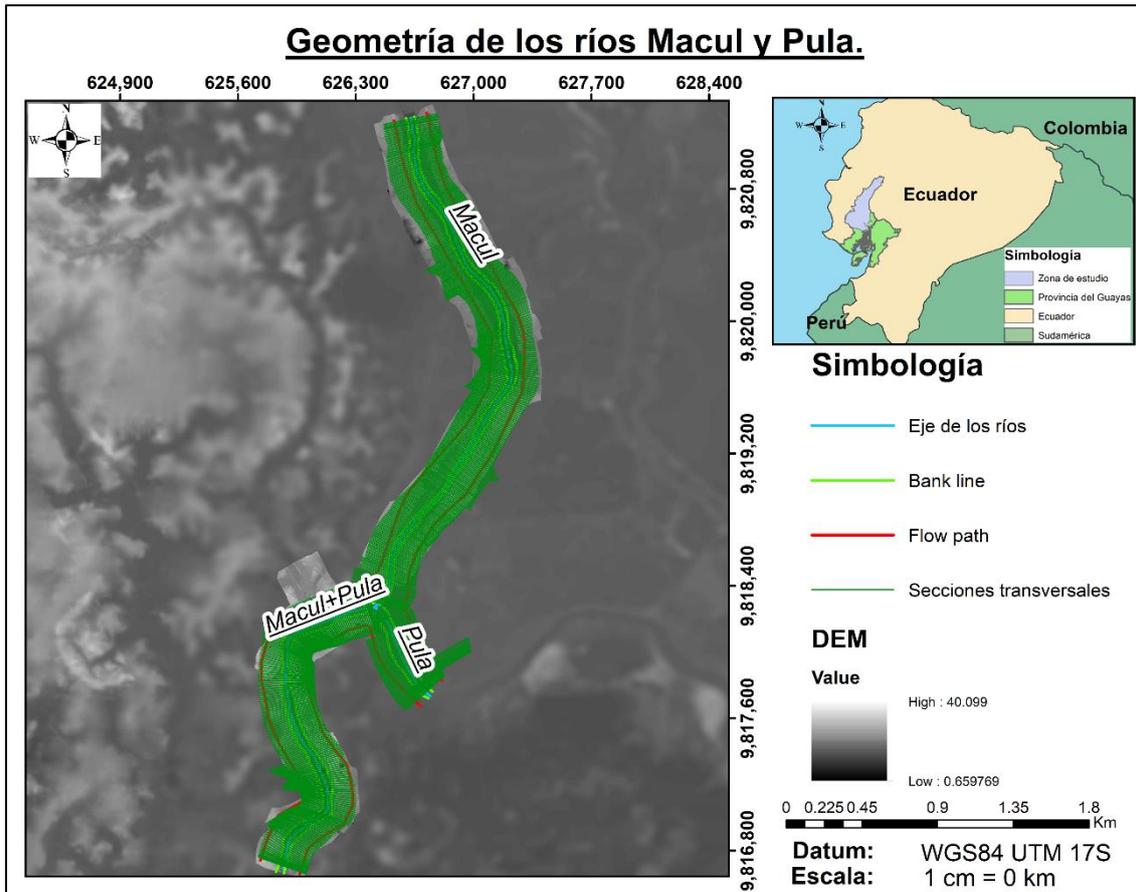


Figure 5 : Géométrie des rivières de la zone d'étude.

Río Macul									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularid supr	cambios sección	obstrucc	vegetación	meandros	n corr
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Medium	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3345 - 0+3135	Llanura izq	0.028	0.004	0.000	0.025	0.043	1.00	0.100
		Canal	0.031	0.007	0.005	0.001	0.010	1.00	0.054
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.020	0.040	1.00	0.092
			Arena / Arena gruesa / Arena	Minor / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3135 - 3075	Llanura izq	0.027	0.004	0.000	0.024	0.038	1.00	0.093
		Canal	0.031	0.008	0.005	0.001	0.010	1.00	0.055
		Llanura der	0.026	0.005	0.000	0.022	0.035	1.00	0.088
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Very Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+3075 - 0+2485	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.027	0.050	1.00	0.110
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.002	0.010	1.00	0.059
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.023	0.040	1.00	0.095
			Arena / Arena gruesa / Arena	Moderate / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible / Appreciable	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2485 - 0+2275	Llanura izq	0.027	0.006	0.000	0.028	0.040	1.00	0.101
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.001	0.010	1.00	0.056
		Llanura der	0.026	0.005	0.000	0.027	0.040	1.00	0.098

Río Pula									
Río	Tramo	Elemento	Base	irregularid supr	cambios sección	obstrucc	vegetación	meandros	n corr
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Medium	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+2190 - 0+1970	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.025	0.049	1.00	0.107
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.004	0.010	1.00	0.059
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.023	0.040	1.00	0.095
			Arena / Arena gruesa / Arena	Minor / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1970 - 1630	Llanura izq	0.027	0.004	0.000	0.027	0.038	1.00	0.096
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.004	0.010	1.00	0.061
		Llanura der	0.026	0.010	0.000	0.026	0.048	1.00	0.110
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible /	Very Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1630 - 0+1330	Llanura izq	0.028	0.005	0.000	0.026	0.049	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.008	0.008	0.004	0.010	1.00	0.061
		Llanura der	0.026	0.008	0.000	0.028	0.036	1.00	0.098
			Arena / Arena gruesa / Arena	Moderate / Moderate / Minor	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible / Appreciable	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1330 - 0+1110	Llanura izq	0.027	0.005	0.000	0.026	0.049	1.00	0.107
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.002	0.010	1.00	0.057
		Llanura der	0.026	0.007	0.000	0.024	0.030	1.00	0.087
			firm_soil / Arena gruesa / arena	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Appreciable / Negligible / Minor	Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+1110 - 0+900	Llanura izq	0.028	0.006	0.000	0.020	0.040	1.00	0.094
		Canal	0.031	0.007	0.007	0.001	0.010	1.00	0.056
		Llanura der	0.026	0.006	0.000	0.019	0.039	1.00	0.090
			Arena / Arena gruesa / firm_soil	Minor / Moderate / Moderate	Alternating occasionally	Minor / Negligible / Appreciable	Very Large / Small / Large	Minor	[s/m ^{1/3}]
1	0+900 - 0+440	Llanura izq	0.026	0.005	0.000	0.026	0.051	1.00	0.108
		Canal	0.031	0.009	0.010	0.004	0.010	1.00	0.064
		Llanura der	0.028	0.010	0.000	0.026	0.040	1.00	0.104

Figure 6 : Estimation des coefficients de rugosité dans les rivières Macul et Pula.

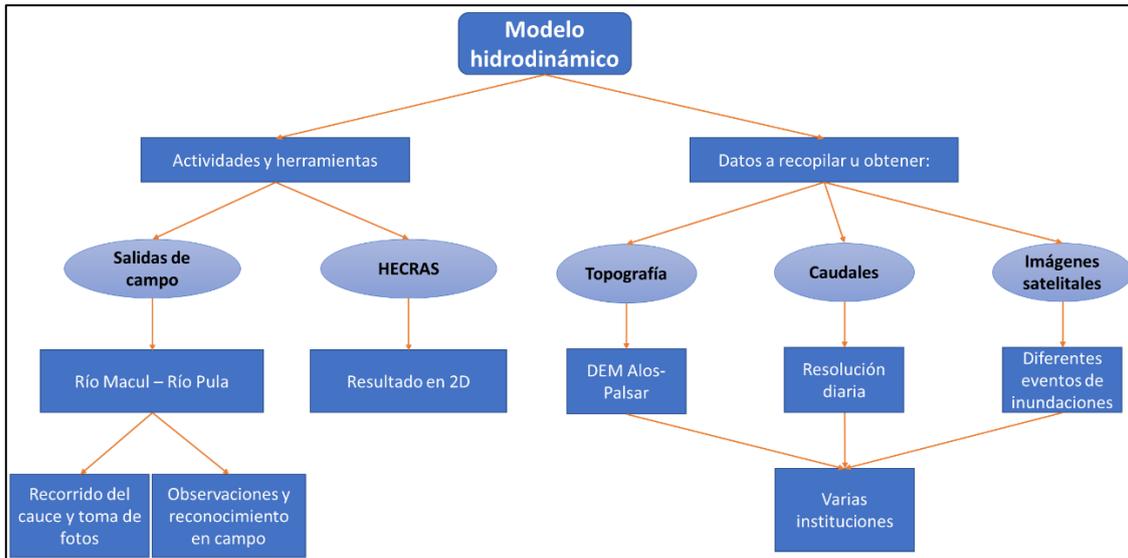


Figure 7 : Schéma du modèle hydrodynamique.

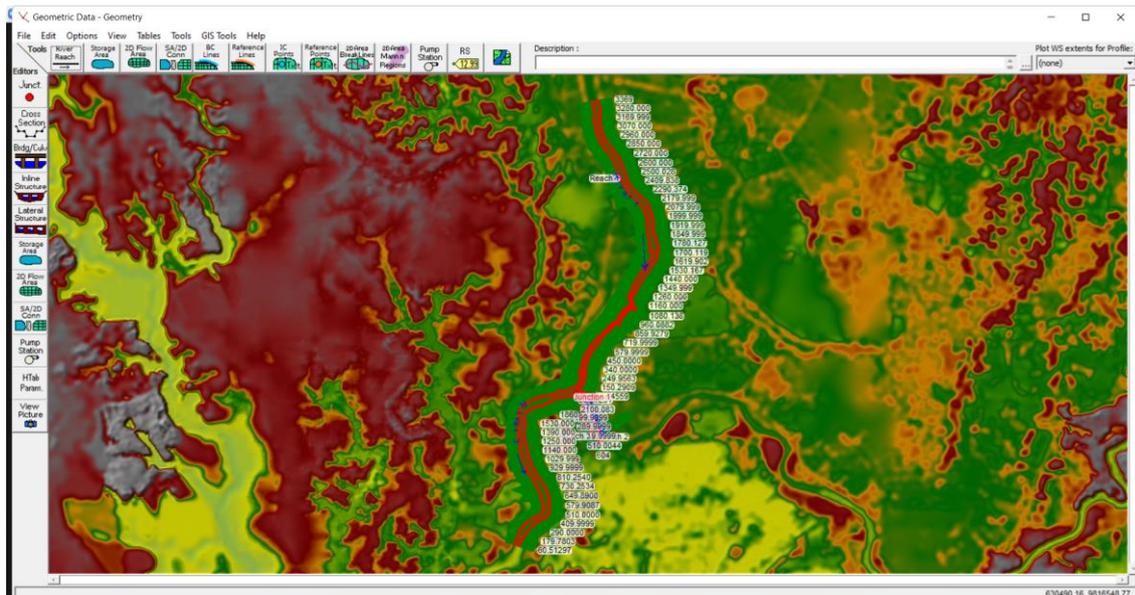


Figure 8. Géométrie des rivières Macul et Pula à Hec-Ras.

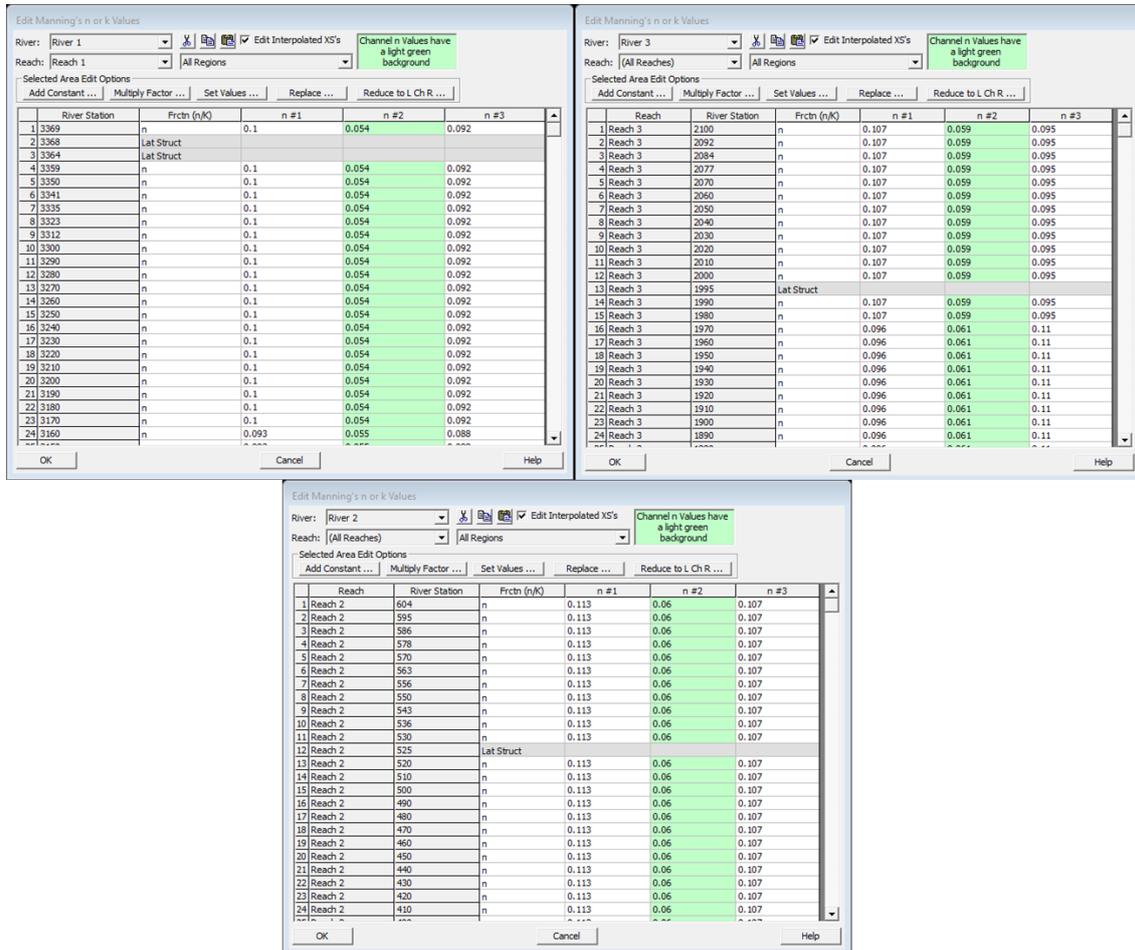


Figure 9 : Saisie des données dans les sections transversales.

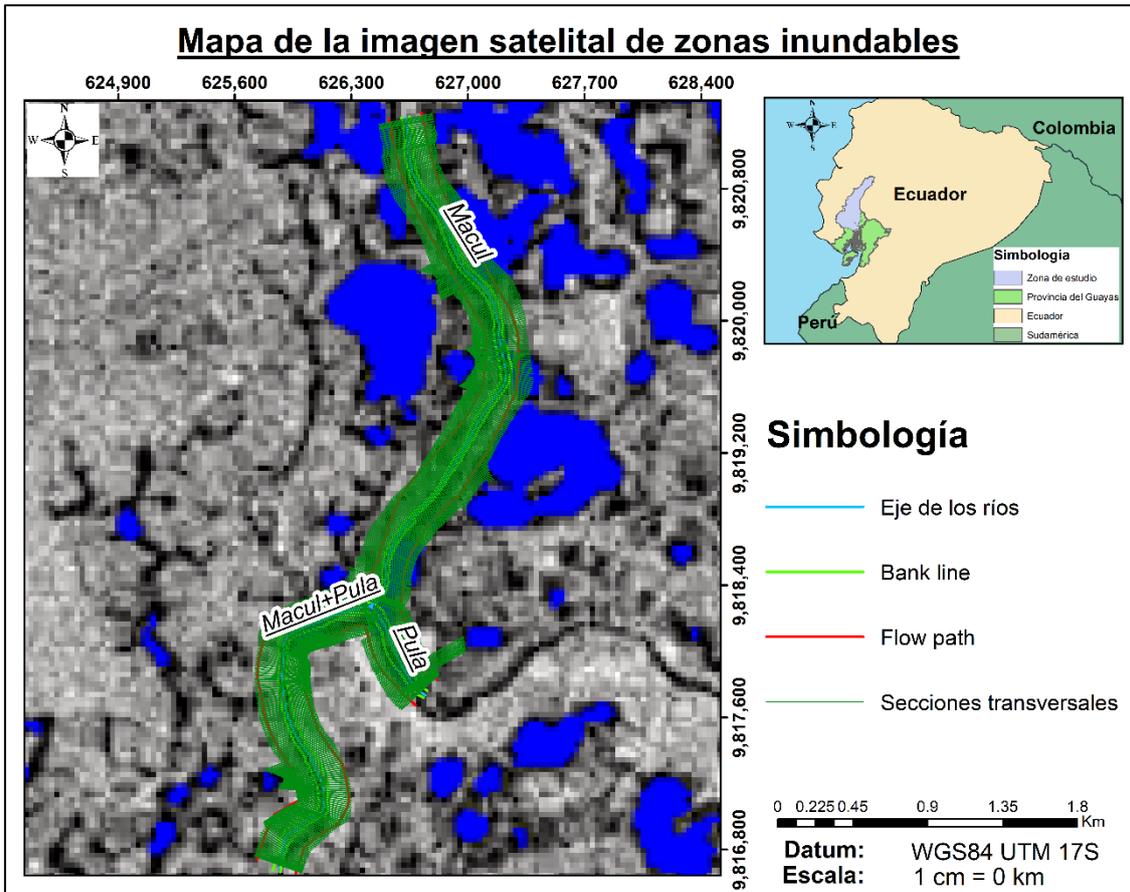


Figure 10 : Zones d'inondation dans la zone d'étude.

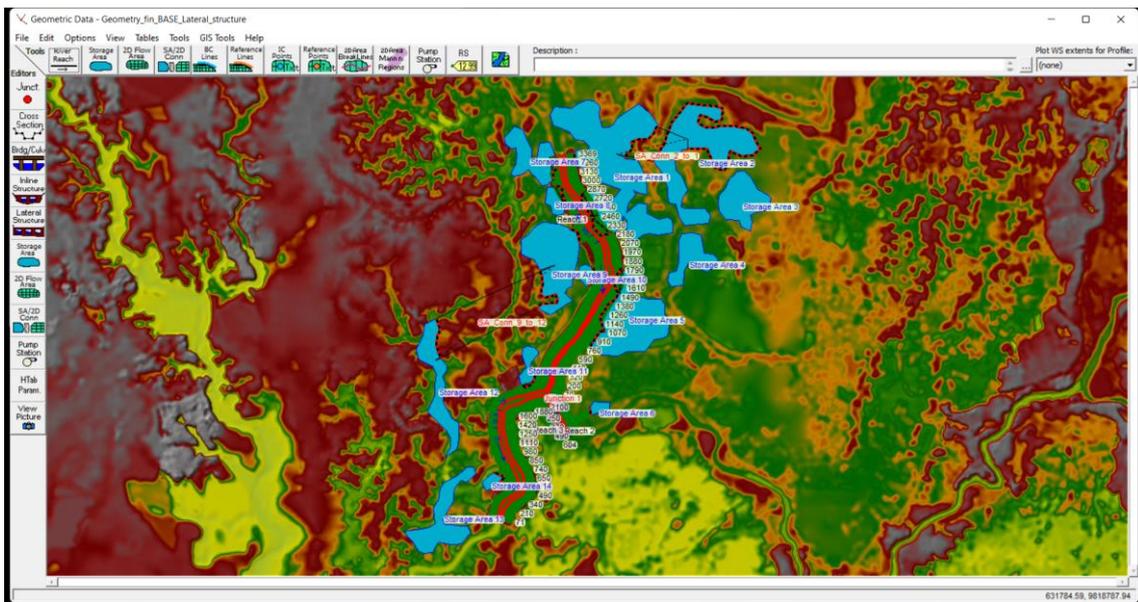


Figure 11. Données géométriques finales de la zone d'étude.

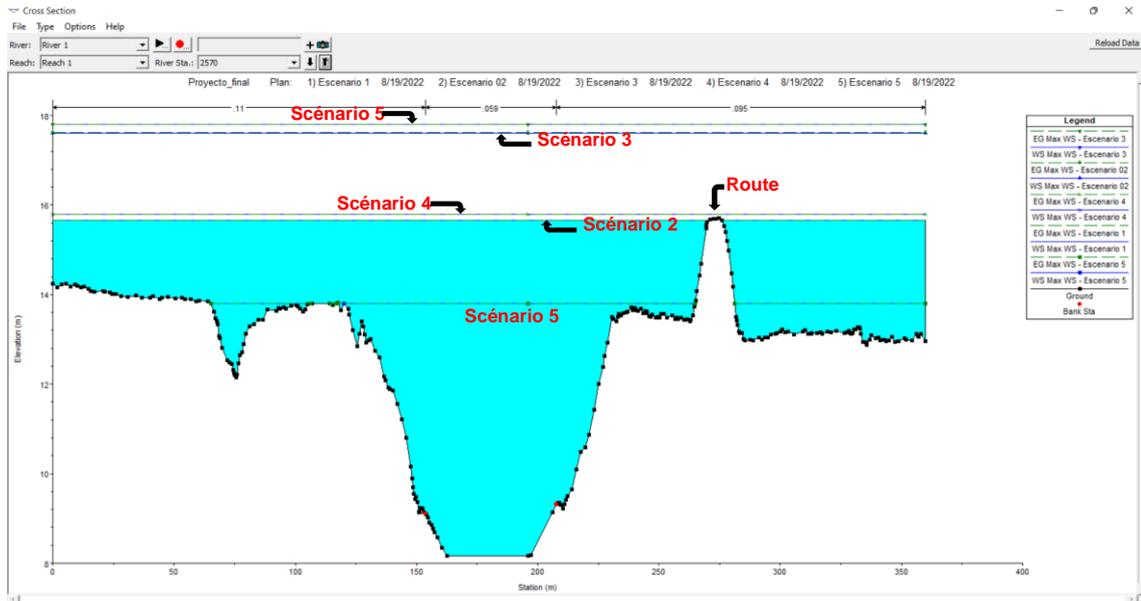


Figure 12 : Section inondable de la rivière en amont de Macul.