



**FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA
Y URBANISMO**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS

**ANÁLISIS DEL MECANISMO DEL COLAPSO MASIVO
ASOCIADO A LA FALLA PLANA PARA DETERMINAR LA
EROSIÓN DEL PUENTE PUCALÁ**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

Autor:

Bach. ZAPO VARGAS NEER CRISTHIAN

PIMENTEL - 2016

**“ANÁLISIS DEL MECANISMO DEL COLAPSO MASIVO ASOCIADO
A LA FALLA PLANA PARA DETERMINAR LA EROSIÓN DEL
PUENTE PUCALÁ”**

Ing. Zuloaga Cachay José Fortunato
Asesor metodólogo

Ing. Arriola Carrasco Guillermo Gustavo
Asesor especialista

Msc. Ing. Omar Coronado Zuloeta
Presidente del Jurado de tesis

Msc. Ing. Zelada Zamora Wilmer Moisés
Secretario del Jurado de tesis

Ing. Arriola Carrasco Guillermo Gustavo
Vocal del Jurado de tesis

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme dado la vida y estar siempre conmigo, para lograr mis objetivos con humildad y sencillez, para ser un profesional de buenos valores y principios hacia los demás.

A mi familia

La presente tesis se la dedico a mi familia a mis padres Carlos Alberto y Magaly Florybel, por brindarme el apoyo y consejos que me dieron para ser una mejor persona, a mis hermanas Katherine, Jaqueline y Samira que gracias a ellas no me rendí hasta lograr la meta que me propuse ser un profesional.

Al mis docentes

Por haberme inculcado las enseñanzas de las cuales llevo un lindo recuerdo al director de escuela de ingeniería civil Msc. Ing. Omar Coronado Zuloeta, Msc. Ing. Wilmer Zelada Zamora y Ing. Guillermo Arriola Carrasco.

Gracias por haber fomentado, el deseo de superación, investigación y sobre todo ampliar cada día más los conocimientos en el área de Ciencias e Ingeniería Civil Hidráulica.

AGRADECIMIENTO

Agradezco considerablemente al Ing. Guillermo Arriola Carrasco por el asesoramiento permanente del estudio desarrollado, y brindarme el tiempo adecuado para el desarrollo de mi Tesis.

A la Universidad Señor de Sipán, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, a nuestros docentes, por permitirme ser parte de una generación de triunfadores y gente productiva para el país y brindar los conocimientos adquiridos de cada uno de ellos para no rendirse y estar preparados para cualquier adversidad de la vida.

A cada uno de mis familiares y amigos que apostaron por mi investigación y nunca me defraudaron haciendo sentir una persona muy especial en esta etapa bonita de mi vida que fue como alumno.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE GENERAL	v
INDICE DE GRÁFICOS	x
INDICE DE ECUACIONES	xiv
INDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xv
INTRODUCCION	xvi
CAPITULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	
1.1 Situación problemática	17
1.1.2 A nivel nacional	19
1.1.3 A nivel local	22
1.2 Formulación del problema	26
1.3 Delimitación de la investigación	26
1.4 Justificación e importancia de la investigación	27
1.4.1 Justificación tecnológica	27
1.4.2 Justificación ambiental	27
1.4.3 Justificación socioeconómica	27
1.5 Limitaciones de la investigación	27
1.6 Objetivos de la investigación	28
1.6.1 Objetivo general	28
1.6.2 Objetivos específicos	28

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio_____	30
2.1.1 A nivel internacional_____	30
2.1.2 A nivel nacional_____	31
2.1.3 A nivel local_____	36
2.2 Estado del Arte_____	37
2.2.1 Modelación de la erosión de márgenes por mecanismo de colapso masivo asociado a falla plana_____	37
2.2.1 Implementación del modelo hidráulico Hec - GeoRas en la modelación hidráulica del sistema para el control de inundaciones de los ríos cañar y Bulubulu_____	38
2.3 Bases teórica científica_____	39
2.4 Definición de la terminología_____	42

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación_____	45
3.1.1 Planteamiento de la solución_____	45
3.2 Población y muestra_____	45
3.3 Hipótesis _____	45
3.4 Variables _____	45
3.5 Operacionalización_____	46
3.5.1 Variable única_____	46
3.6 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos_____	47
3.6.1 Métodos de investigación_____	47
3.6.2 Técnicas de recolección de datos_____	47
3.6.3 Descripción de los instrumentos utilizados_____	49

3.7 Procedimiento para la recolección de datos_____	50
3.7.1 Diagrama de flujo de procesos_____	50
3.7.2 Descripción de procesos_____	50
3.7.3 Equipos, materiales e instrumentos_____	56
3.7.4 Recursos humanos_____	57
3.7.5 Planos_____	57
3.7.6 Normatividad_____	57
3.8 Análisis estadístico e interpretación de los datos_____	58
3.8.1 Enfoque cualitativo_____	58
3.8.2 Enfoque cuantitativo_____	58
3.9 Criterios éticos_____	58
3.9.1 Ética de la recolección de datos_____	58
3.9.2 Código ético de la profesión_____	58
3.9.3 Criterios de rigor científico_____	61

CAPITLO IV: ÁNALISIS E INTERPRETCIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Resultados en tablas y gráficos_____	63
4.1.1 Estudio hidrológico_____	63
4.1.1.1 Descripción general de la cuenca del rio Chancay_____	63
4.1.1.2 Pluviometría e hidrometría_____	66
4.1.1.3 Estación Carhuaquero - Racarrumi del rio Chancay_____	66
4.1.1.4 Análisis de la información pluviométrica_____	68
4.1.1.5 Análisis de la información hidrométrica_____	71
4.1.1.6 Métodos para determinar los caudales Máximos_____	71
4.1.1.7 Caudal de diseño_____	78
4.1.2 Estudio hidráulico_____	79

4.1.2.1 Pendiente del cauce principal_____	80
4.1.2.2 Cálculos hidráulicos_____	81
4.1.3 Geología del área de fundación de la estructura_____	85

CAPITULO V: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

5.1 Modelo del mecanismo del colapso masivo asociado a la plana_____	88
5.2 Aplicación del mecanismo del colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión del puente Pucalá _____	97
5.2.1 Discusión de los resultados obtenidos_____	99

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES_____	102
6.2 RECOMENDACIONES_____	102

REFERENCIAS

ANEXOS

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo principal el estudio y análisis del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla en el plano debido a que este tipo de falla es la más común que se pueden presentar en taludes de ríos y pues de una manera u otra influyen en la erosión de sus márgenes y en el caso de estructuras hidráulicas aledañas a dicho tipo de falla puede provocar socavación general y local en un menor período de retorno al que se haya diseñado.

La teoría en la que se basó la presente tesis es la de un modelo hidrodinámico, sedimentológico y morfológico puesto que depende de las características geométricas de la sección transversal, el comportamiento hidráulico del río y las características del suelo de la zona de estudio, además es imprescindible el uso de un programa denominado "SOCAVA" desarrollado por el Instituto Nacional del Agua, el Laboratorio de Hidráulica y el Laboratorio de Modelación Matemática de la Universidad de Buenos Aires de Argentina pues permite determinar las características reales del comportamiento de la erosión de las márgenes de un río bajo la condición de la erosión progresiva del estrato superior respecto al estrato inferior ya que las fallas por esfuerzos de corte se generan entre ambos estratos provocando inestabilidad.

El presente trabajo de investigación pretende servir modelo y base para futuras investigaciones con respecto a los distintos puentes alrededor del país y de nuestro litoral.

Palabras claves: Colapso masivo, falla plana, erosión, río, puente, caudal

ABSTRACT

This thesis research includes the study and analysis of the mechanism of mass collapse associated with failure in the plane because this type of failure is the most common that can occur on slopes of rivers and because one way or another influence the erosion of their margins and in the case of hydraulic structures surrounding this type of failure can cause general and local scour in a shorter period of return to ever designed. The theory behind this thesis was based is that of a hydrodynamic, sedimentological and morphological model since it depends on the geometrical characteristics of the cross section, the hydraulic behavior of the river and soil characteristics of the study area, is also essential to use a program called "SOCAVA" developed by the National Water Institute, the Hydraulics Laboratory and the Laboratory of Mathematical Modeling at the Buenos Aires University from Argentina as to determine the actual characteristics of the behavior of the erosion of margins a river under the condition of the progressive erosion of the upper layer relative to the lower layer as failures by shear generated between both layers causing instability. The case was analyzed under these considerations mentioned is the bed of the Chancay River in the vicinity of Pucalá bridge, because the bridge is one of the largest in the Lambayeque region and is prone to constant changes in the river morphology and required therefore determine possible failures under current conditions to which it is exposed.

Key Words: Massive collapse, flat failure, erosion, river, bridge, flow.

INTRODUCCION

En la actualidad las diversas fallas que se producen en los cauces de los diferentes ríos a nivel mundial han sido provocadas por los cambios de la morfología fluvial, transporte de sedimentos y régimen hidrológico, estos cambios conforme transcurre el paso de los años y según las estadísticas mundiales son acelerados debido al desarrollo humano asociados a su vez a la deforestación de las cabeceras de cuencas fuente principal de sustento ecológico – ambiental. En nuestro país por ejemplo se tienen diversas obras de infraestructura afectadas por inundaciones o la misma contaminación de las aguas superficiales los cuales han llevado a que aumente progresivamente la erosión en los cauces de los ríos, entonces vista esta problemática y en general es necesario controlar este proceso empleando metodologías predictivas que asocien el colapso en las márgenes de los ríos debido a los continuos procesos de erosión que están afectando constantemente su estabilidad permitiendo en algunos casos evaluar los riesgos y consecuencias de los daños a corto y largo plazo.

Los casos analizados de fallas por erosión por lo general tienen en sus márgenes estratos no cohesivos (suelos arenosos) sobre estratos cohesivos (suelos arcillosos) los cuales han llevado que poco a poco se produzcan fallas por esfuerzos de corte en las márgenes del cauce generadas en relación a la pérdida de apoyo entre ambos estratos, este último concepto en global es denominado “Mecanismo de colapso masivo”, sin embargo el factor agregado a este concepto se relaciona a la forma más simple pero a la vez que refleje lo real del comportamiento en un talud de un río que es en este caso es la falla “Plana”.

El presente trabajo de investigación está dividido en seis capítulos en los cuales se describió los aspectos más significativos: “Mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana”.

La primera parte corresponde al capítulo I, el primer capítulo comprende la situación problemática de la investigación, los objetivos que se pretenden alcanzar, los alcances de la investigación, la justificación y las limitantes establecidas para el desarrollo del presente trabajo.

El capítulo II nos muestra los antecedentes con la finalidad de conocer donde han sido desarrolladas e implementadas tanto a nivel internacional, nacional y local; los componentes del mecanismo del colapso masivo las bases teóricas científicas hasta la terminología.

El capítulo III nos muestra como punto importante los cuadros comparativos entre los métodos empíricos y el software, detallando los diferentes ensayos realizados como la modelación en el Software tanto como los métodos Hidráulicos utilizados, como también del programa HEC - RAS encontrar los porcentajes ideales para realizar el mecanismo del colapso masivo

En el capítulo IV describe el Análisis e Interpretación de los Resultados obtenidos en el laboratorio y Software. Cada tabla, gráfica y modelación es producto del ensayo que se realizó, siendo interpretada y descrita cada resultado. Además, se muestran fotografías que permiten ilustrar los procedimientos que se realizaron en las diferentes etapas del proyecto.

En el capítulo V nos muestra la modelación del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión del cauce.

En el capítulo VI, finalizando la investigación y después de los análisis descritos en capítulos anteriores se menciona las recomendaciones al aplicar el mecanismo del colapso masivo en el puente pucalá, además de las conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO I:

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Situación problemática

1.1.1 A nivel internacional

EROSIÓN EN PILARES Y ESTRIBOS EN PUENTES

Según estudios de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) publicados en 1994 “La mayor parte de los puentes que han fallado, en USA y en todo el mundo, ha sido debido a la socavación.” Shirole y Holt en 1991 estudiaron 1000, de los 600 000 puentes existentes en Estados Unidos, que habían fallado a lo largo de un periodo de 30 años y encontraron que el 60% de las fallas se originó por problemas hidráulicos. Wardhana y Hadipriono estudiaron 500 fallas ocurridas entre 1989 y el 2000 en 500 puentes de los Estados Unidos y encontraron que el 53% se debió a las avenidas y a la socavación.

Rocha, Erosion en pilares y estribos en puentes. (2010)

MONITOREO DE LA EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN EN PUENTES

En el país Argentina se encuentra en una problemática sumamente grave, puesto que faltan políticas de prevención, que incluyan un efectivo control y mantenimiento de los Puentes, tanto a nivel nacional como a nivel provincial y municipal. Los efectos Hidráulicos son nuevamente actores principales como podremos observar a continuación. Prueba de ello, se puede citar lo ocurrido en el año 2006 en el puente ubicado sobre el Río Seco – Provincia de Salta. Una importante crecida de dicho río, arrastro el puente y el badén construidos sobre la traza de la Ruta Nacional N° 34. La consecuencia de dicho colapso fue que la ciudad de Tartagal y parte del Departamento de San Martín quedaron incomunicados con el consiguiente perjuicio para los 100.000 habitantes de la región. El río Seco es un

río de Montaña, razón por la cual se tienen por efecto, crecidas violentas de corta duración en el tiempo, pero de gran poder destructivo.

Guitelman & Valle. (2008)



Fuente: www.gygingeneria.com.ar

ESTUDIO DE LAS CAUSAS Y SOLUCIONES ESTRUCTURALES DEL COLAPSO TOTAL O PARCIAL DE LOS PUENTES VEHICULARES DE COLOMBIA DESDE 1986 AL 2011, Y LA EVALUACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DEL DERRUMBAMIENTO DE UNO DE ELLOS

En 1990 el Ingeniero Carlos Di Terlizzi realizó un estudio consistente en determinar las causas del colapso del Puente Cobaría, localizado en la carretera Cúcuta - Caño Limón en el municipio de Cubará, sobre el Río Cobaría. Este puente fue construido en 1965 por la empresa CRUP de Alemania y estaba conformado por una estructura tipo colgante de 130m de longitud y soportado por 16 pendolones de 2 pulgadas de diámetro ubicadas a 10 m de distancia cada uno, hasta el año de 1989 la empresa Occidental de Colombia era la encargada de efectuarle el

mantenimiento a la vía en donde se encontraba el puente. El puente comenzó a sufrir daños sobre el estribo derecho desde 1985 debido a la influencia del Río Cobaría el cual empezó a socavar su cimentación. Pero fue a finales de 1986 cuando la estructura se vió seriamente afectada en la medida en la que el tránsito vehicular tuvo que ser suspendido y en su reemplazo se instaló un puente provisional tipo Bailey a 800m aguas abajo, ya que el estribo derecho presentó un asentamiento diferencial de 1.15 m y ante la falla de este apoyo se ocasionó una deformación en la superestructura desplazándola 1.30m de su sitio original, sumado a esto la afectación que se produjo en el estribo. Como una solución provisional ante el problema presentado, se construyeron pórticos en el río cimentados sobre un cajón autofundante y columnas de tubería que soportaba la superestructura. Esta solución tardó dos años hasta que nuevamente el Río Cobaría volvió a ocasionar daños sobre el estribo reparado.

Cuba. (2013)

1.1.2 A nivel nacional

MODELAMIENTO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO APLICADO AL CÁLCULO DE SOCAVACIÓN EN PUENTES POTRERO (Km 165 + 527.00) Y MAYGASBAMBA (Km 197 + 688.15), UBICADOS EN CARRETERA CHOTA – BAMBAMARCA – HUALGAYOC

En lo que respecta al Perú la situación es aún más grave. Los dos últimos Meganiños (1982-83 y 1997-98) causaron daños considerables a la infraestructura vial, especialmente a los puentes. Se podría mencionar, por ejemplo, que durante el Meganiño 1982 - 1983, caracterizado por fuertes crecidas fluviales especialmente en la costa norte, resultaron afectados o destruidos 55 puentes. Con ocasión del

Meganiño 1997-98, de similares características al antes mencionado, los daños en la infraestructura vial fueron también considerables. En el Informe que preparó el Colegio de Ingenieros del Perú sobre el tema, se señaló que en 1998 hubo 58 puentes destruidos y 28 afectados. Prácticamente, la totalidad de las fallas ocurridas en ambos Meganiños tuvo su origen en problemas de Hidráulica Fluvial. Cuando se trata de puentes importantes, o con problemas especiales, en áreas sujetas al Fenómeno de El Niño debe considerarse sus efectos mediante un adecuado Hidrograma de Crecidas (Avenidas). En consecuencia, los estudios hidráulicos resultan sumamente importantes para la prevención de fallas de puentes en el Perú y en todo el mundo. Los daños en las vías de transporte tienen un significado muy importante. En general pueden implicar pérdida de vidas humanas, daños a las propiedades y la interrupción del servicio, lo que significa imposibilidad o dificultad en la comunicación terrestre, aislamiento de los pueblos, perjuicio a las actividades comerciales, escasez y encarecimiento de alimentos y de artículos de primera necesidad. Los daños también pueden tener implicancias en aspectos de la Defensa Nacional, además, por cierto, de la necesidad de afrontar los costos de reposición, así como los costos sociales, políticos y estratégicos. Como se ha expuesto, los daños que sufren los puentes tienen diversos orígenes, pero fundamentalmente provienen del comportamiento hidráulico de ríos y quebradas, de la mala ubicación de las obras y, en general, de su inadecuada concepción para las condiciones presentadas. Prácticamente, la totalidad de las fallas ocurridas en las últimas décadas en los puentes del Perú se ha producido por problemas de Hidráulica Fluvial y no por los llamados “problemas estructurales”. Es, pues, indispensable mirar el problema desde esta perspectiva y

hacer algunas reflexiones sobre el comportamiento de los ríos y su interacción con los puentes.

Yeily & Concepción. (2014)

EL MEGANIÑO 1982-83, “LA MADRE DE TODOS LOS NIÑOS”

En Piura 1983 la crecida tuvo una duración de seis meses y el volumen total descargado fue de 11 470 millones de metros cúbicos (Estación Puente Sánchez Cerro). La descarga mencionada para el año 1983 fue superior a la suma de las descargas registradas en la misma estación a lo largo de los 18 años 11 precedentes. En 1998, año de otro importante Meganiño, la descarga del río Piura duró cuatro meses y llegó a los 8 750 millones de metros cúbicos, cantidad superior a la suma de las descargas ocurridas desde el Meganiño de 1983.

Rocha, El Mega niño. (1982-83)

DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO OPTIMIZADO DE PUENTES CON TERRAPLENES

En Tumbes como consecuencia de las intensas lluvias ocurridas durante El Niño de 1998 en el Perú, en sólo los primeros 3 meses de ese año 68 puentes fueron destruidos, 13 de los cuales no tenían más de 14 años de antigüedad, y ocho de ellos fueron construidos en los últimos cinco años previos a El Niño. Los mayores daños se produjeron en la costa norte del país, en los departamentos de Lambayeque, Piura y Tumbes. Tan sólo en la ciudad de Piura, dos de los cuatro puentes existentes colapsaron; el puente Bolognesi sucumbió en las aguas del Río Piura (murieron 3 personas, y desaparecieron 10), demostrando la vulnerabilidad hidráulica de nuestros puentes que simplemente no están diseñados para soportar

desde esta perspectiva y hacer algunas reflexiones sobre el comportamiento de los ríos y su interacción con los puentes lambayecanos. Uno de estos puentes es el Puente Pucalá, localizada en el distrito de Pucalá, perteneciente a la provincia de Chiclayo del departamento de Lambayeque, Perú, el cual limita con los siguientes distritos:

Norte: Con el distrito de Pátapo.

Este: Con los distritos de Chongoyape y Oyotún.

Sur: Con los distritos de Cayaltí y Zaña.

Oeste: Con el distrito de Tumán.

Altitud: 54 m.s.n.m.



Fuente: Google Earth

Vista Frontal



Figura 4: Puente Pucalá – vista de la sección principal.

Fuente: Elaboración propia.

Vista Superior



Figura 5: Puente Pucalá - vista de carpeta asfáltica.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Enrocado de los Márgenes del Rio



Figura 8: Defensa ribereña a los márgenes del puente

Fuente: Elaboración propia

1.2 Formulación del problema

¿Cómo analizar el mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión del cauce en el Puente Pucalá?

1.3 Delimitación de la investigación

La investigación y toma de datos se realizará en el Puente Pucalá y encuentra ubicado en el Distrito de Pucalá, provincia de Chiclayo, del departamento de Lambayeque, Perú. Cuyas coordenadas geográficas son: Latitud (s): 6° 35' a 6° 48'; Longitud (w): 79° 21' a 79° 41'; Altitud: 54 m.s.n.m., y limita: Norte: Con el distrito de Pátapo. Este: Con los distritos de Chongoyape y Oyotún. Sur: Con los distritos de Cayaltí y Zaña. Oeste: Con el distrito de Tumán.

1.4 Justificación e importancia de la investigación

1.4.1 Justificación tecnológica

El estudio de la erosión se realizará con los últimos Software tecnológicos que permita realizar una comparación empleando el modelo de mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana y el programa HEC-RAS.

1.4.2 Justificación ambiental

El presente estudio se ve justificado principalmente por las fallas que ocurren en puentes, las cuales al producirse causan daños ambientales y contaminación del agua del Rio Chancay, las aguas del río Chancay son utilizadas tanto para riego como para consumo humano de los pobladores que viven en las riveras del río.

1.4.3 Justificación socioeconómica

Este aspecto socioeconómico resulta de vital importancia en la sociedad lambayecana debido a que los puentes son los medios de comunicación vial y de desarrollo social y económico. De ahí la importancia de prevenir las fallas en los puentes de todo Lambayeque y el Perú.

1.5 Limitaciones de la investigación

El proyecto de estudio no incluye diseño estructural, rediseño y/o cálculos estructurales. Tampoco incluye la elaboración de un modelo numérico de la erosión del río para el Puente Pucalá.

1.6 Objetivos de la investigación

1.6.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión del cauce en el puente Pucalá.

1.6.2 Objetivos específicos

1. Seleccionar y recolectar la información disponible respecto a las características físicas y mecánicas del suelo, hidrología de la cuenca y comportamiento hidráulico.
2. Emplear el modelo de mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para el adecuado análisis hidráulico del comportamiento del río en la zona del Puente Pucalá.
3. Comparar los resultados del modelo de mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana y del software HEC – RAS.
4. Determinar los niveles de erosión en base al modelo del mecanismo de colapso masivo y HEC – RAS.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio

2.1.1 A nivel internacional

Pizarro, R. (2009) en su trabajo de investigación denominado **PROPUESTA DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DE EROSIÓN HÍDRICA PARA LA REGIÓN DE COQUIMBO, CHILE.**

En función de los resultados alcanzados, fue posible establecer modelos matemáticos predictivos de la erosión, en función de las tres variables pluviométricas especificadas anteriormente. Así, los modelos se establecieron en función de regresiones lineales múltiples, en donde las variables dependientes son E, S, EN y SM; en tanto, las variables independientes corresponden a MT_{pp}, IT e Imáx1h, con sus respectivas transformaciones, a saber, Imáx1h², IT(1/2), MT_{pp}³, etc., las que actuaron como variables auxiliares que contribuyen a minimizar la variación total de los datos. Es importante mencionar que cada uno de los modelos mostrados corresponde al final seleccionado y es el que presentó una mayor significancia estadística, en términos de la relación de variables y la explicación del modelo (coeficiente de determinación y error estándar de la estimación), entre otros.

Alvarado & Ettmer. (2007) en su trabajo de investigación denominado **MORFOLOGÍA FLUVIAL Y EROSIÓN EN CURVAS ABRUPTAS DEL RÍO UCAYALI, PERÚ.**

El río Ucayali se caracteriza por presentar un progresivo cambio en sus formas de cauce en planta, mostrándose un complejo cauce anastomósico, meándrico, y de abundantes islas sin y con vegetación. En su cuenca intermedia, estas islas se presentan en el trayecto de manera abundante, y la característica meandriforme es

la predominante, formando curvas abruptas descritas con largas barras de sedimentación en la curva interna y profundas fosas de erosión en la curva externa. Cambios en las formas en planta y en la sección transversal del río Ucayali y modificaciones en la morfología del río debido a los fenómenos de erosión y sedimentación causan profundas fosas de erosión a lo largo de la curva externa del río. Puesto que no existe una presencia de muchos ríos tributarios mayores que descarguen en el río Ucayali, la modificación en la forma del cauce del río en estudio resulta hacia aguas abajo en un decremento de la pendiente longitudinal del río, así como también en el tamaño del sedimento.

Teniendo como base una investigación previamente desarrollada y presentada sobre “topografía del cauce y erosión en curvas abruptas de ríos, e influencia de las obras de protección de margen”, relacionado a las características meandriiformes de los ríos amazónicos, y disponiendo información útil detallada del río Ucayali en un tramo de longitud de estudio de 1000 km desde la ciudad de Pucallpa hasta su confluencia con el río Marañón de aproximadamente 50 curvas abruptas, se presenta una aplicación a un caso real con respecto a una fórmula propuesta para la predicción de la profundidad máxima de erosión en curvas abruptas sin protección de margen, en conjunto con la correspondiente medida de mitigación a través de una fórmula estimativa para la predicción de la profundidad máxima de erosión en curvas abruptas con protección de margen flexible.

García & Basilea. (2007) en su trabajo de investigación denominado **MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DE SISTEMAS CAUCE - PLANICIE DE INUNDACIÓN EN GRANDES RÍOS ALUVIALES DE LLANURA.**

La modelación hidrodinámica de procesos de inundación en valles aluviales constituye la base para el análisis de importantes problemas hidroambientales. Por un lado, la modelación permite la evaluación del riesgo de inundaciones, además los modelos hidrodinámicos que describen apropiadamente los procesos hidráulicos en sistemas cauce planicie de inundación pueden ser utilizados para representar otros subprocesos, tales como el transporte de sedimentos, el transporte de contaminantes y el escurrimiento subterráneo en la planicie. El grado de detalle en la representación de procesos hidráulicos es función del tipo y exactitud de las predicciones requeridas, de la calidad de los datos disponibles para parametrizar el modelo y de las escalas espaciales y temporales en las cuales el modelo debe operar. En la última década la representación de la dinámica del flujo hídrico en sistemas formados por cauce principal y planicie de inundación ha sido realizada utilizando modelos. Los modelos 1D y 2D precedentemente fueron aplicados para reproducir mapas de inundación e hidrogramas observados en tramos de ríos de 5 a 60 Km de longitud, con anchos de planicies de inundación menores que 3 Km y con ausencia de cursos secundarios importantes en el valle aluvial. Mientras que, los modelos hidrodinámicos 3D, dados los requerimientos computacionales y la información necesaria para su implementación, han sido aplicados en dominios espaciales definitivamente menores, es decir, para longitudes de tramos del orden del kilómetro, por ello el objetivo principal del presente trabajo es desarrollar e implementar modelos apropiados para evaluar procesos de inundación-sedimentación en valles aluviales de grandes ríos de

llanura. Como parte de las conclusiones podemos destacar que el modelo hidrodinámico implementado representa satisfactoriamente la dinámica del flujo encauzado en el sistema cauce-planicie del tramo estudiado. A los efectos de analizar el funcionamiento hidráulico del sistema en aguas altas es necesario activar las celdas valle. Asimismo, se deben considerar, las obras de infraestructura vial construidas recientemente y que atraviesan completamente el valle aluvial del río Paraná en la zona modelada (conexión física Rosario-Victoria). Por lo tanto, debe incorporarse en el modelo el terraplén y los puentes de la conexión, para analizar el comportamiento actual del sistema, particularmente en condiciones de aguas altas.

García & Menéndez. (2007) en su trabajo de investigación denominado **MODELO INTEGRADO PARA CALCULAR LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA DE CANALES, INCLUYENDO EROSIÓN EN MÁRGENES COHESIVAS.**

Las márgenes de los cursos fluviales están continuamente sometidas a procesos de erosión que afectan su estabilidad. Cuando una margen tiene un estrato base granular sobre el que se encuentra un estrato cohesivo, el mecanismo de falla consiste en la erosión progresiva del estrato granular subyacente, que provoca la pérdida de apoyo del estrato cohesivo suprayacente, con consecuentes fallas por tracción y corte. Para simular numéricamente este proceso, es necesario formular un modelo integrado hidrodinámico sedimentológico y morfológico. En este trabajo se presenta dicho modelo, y se muestran resultados de experiencias numéricas, incluyendo un caso de aplicación. El presente trabajo tiene como objetivo describir y aplicar un modelo de evolución morfológica de canales de fondo granular, que incluye un mecanismo de erosión de márgenes que incluyen un estrato cohesivo.

El modelo integrado utiliza como base el desarrollado para un canal puramente aluvial pero ahora se le incorporan nuevos mecanismos para considerar la existencia de un estrato cohesivo por sobre el estrato granular. El modelo integrado propuesto en el presente trabajo constituye una herramienta eficiente para ocuparse de la evolución morfológica de las secciones transversales de canales en la mayoría de las situaciones prácticas. Presenta la novedad de tratar márgenes con estratos cohesivos. El modelo está basado en una formulación con fuerte contenido físico (de primeros principios), pero preservando la simplicidad al considerar solamente los mecanismos actuantes más relevantes.

Maza Alvarez & García Flores. (1995) en su trabajo de investigación denominado ESTABILIDAD DE CAUCES – CAPITULO 12 DEL MANUAL DE INGENIERIA DE RIOS – INSTITUTO DE INGENIERÍA – UNAM.

En los ríos y arroyos y en los canales excavados en tierra en que hay transporte de sedimentos existe una relación entre la pendiente, la geometría de la sección transversal, los gastos líquidos y sólidos y las características físicas de las partículas o del material que constituye el fondo y, las orillas del cauce. En este trabajo se presentan dichas relaciones ya que una labor importante de los ingenieros consiste en el diseño de canales de tierra y en la rectificación de cauces, la mayoría de las relaciones se han presentado en forma explícita para obtener la altura o tirante de la corriente, el ancho y la pendiente del cauce.

2.1.2 A nivel nacional

Alvarado Ancieta & Bernd Ettmer. (2007) en su trabajo de investigación denominado **CONTROL DEL FENÓMENO DE AGRADACIÓN - DEGRADACIÓN DEL RÍO PIURA, MEDIANTE REALINEAMIENTO DEL CAUCE PRINCIPAL INFERIOR. FENÓMENO EL NIÑO, PIURA, PERÚ**

La erosión en la cuenca alta acompañada del Fenómeno de El Niño altera los regímenes hidrológicos y de transporte de sedimentos en el río Piura, en extremo norte del Perú. Una presa y obras de encauzamiento existentes en la cuenca baja producen el desequilibrio en la forma de planta y geometría del río; sin embargo dichas obras son necesarias para la protección contra inundaciones a fin de evitar daños sustanciales en la propiedad, tales como infraestructura y áreas de irrigación existentes. Finalmente, la desviación del curso o cauce natural de un río en su cuenca baja genera un problema complejo en la morfología del río. Como consecuencia de esto sucede el fenómeno de agradación - degradación significando el tener que adoptar medidas de mitigación a fin de luchar contra los cambios de los niveles de fondo del río, si no se toman en cuenta medidas adecuadas para resolver el problema. Una efectiva evaluación del cauce del río en el proceso de agradación - degradación de la cuenca baja, requiere una eficiente comprensión de los procesos morfológicos que envuelven el ajuste de la geometría del cauce y de las condiciones de equilibrio proyectadas. El objetivo de ésta investigación es el estudio del proceso de agradación - degradación del cauce del río Piura, que da como resultado el realineamiento del cauce principal y extensión del encauzamiento del río en su tramo final como medida efectiva para el control de la erosión y la sedimentación, prevista durante el estudio efectuado en el 2000-2001. La investigación concluye con el análisis de las medidas de encauzamiento

y su justificación, presentándose las alternativas de nuevo trazo del cauce principal, evaluándose sus causas y efectos futuros como medida de mitigación de control de erosión y sedimentación, habiendo sido efectuado el realineamiento del cauce a fines del año 2006.

2.1.3 A nivel local

Arriola & Bejarano. (2013) en su trabajo de investigación denominado **ESTUDIO DE LOS MÉTODOS DE ANÁLISIS BASADOS EN LA SUPERPOSICIÓN DE COMPONENTES DE SOCAVACIÓN PARA PILARES COMPLEJOS APLICADOS AL PUENTE REQUE.**

A nivel local se ha tenido estudios de un puente que se ubica en el mismo cauce del Puente Pucalá, dicho estudio se basó en hacer un análisis comparativo de los métodos para determinar la socavación en los pilares complejos aplicados al Puente Reque. En dicho estudio se realizó la modelación hidrológica de la Cuenca del Río Chancay y la modelación hidráulica de un tramo del Cauce del Río Chancay. Como parte de las conclusiones menciona que el cauce y las márgenes se encuentran expuestos constantemente a procesos de erosión y por ende de socavación debido principalmente a la ubicación del puente y al tipo de suelo que es arenoso – limoso.

Reyes C. (2012) en su trabajo de investigación denominado **PROPUESTA DE ENCAUZAMIENTO DEL RÍO REQUE.**

El objetivo de dicha propuesta, es de dar a conocer una solución en forma definitiva de la antigua problemática de la ubicación de los puentes en el cauce del Río Chancay, consistente en el encauzamiento del Río Reque desde la zona de Siete

Techos hasta su desembocadura en el mar, lo que permitiría estabilizar el actual puente y crear condiciones hidráulicas para la construcción de otros puentes que Chiclayo necesita. Esta alternativa estaría basada en un estudio cinemático previo del río.

2.2 Estado del Arte

2.2.1 Modelación de la erosión de márgenes por mecanismo de colapso masivo asociado a falla plana

El proceso de erosión de márgenes induce ingresos laterales de sedimentos y cambios morfológicos significativos en el sistema fluvial. La erosión de márgenes se produce como consecuencia de la acción combinada de diversos factores, tales como el desgaste por exposición cíclica a procesos de humedecimiento y secado, la erosión fluvial del lecho en proximidades de la margen, la erosión fluvial del pie de la margen y distintos tipos de mecanismos de colapsos masivos por inestabilidad geotécnica. En zonas de temperaturas bajo cero, el efecto cíclico de congelamiento y descongelamiento del contenido de agua de la margen juega un rol importante. En este trabajo se presenta el desarrollo, la implementación y el análisis de sensibilidad de un modelo de erosión de márgenes, el cual contempla el efecto combinado de la erosión fluvial del lecho, la erosión fluvial lateral de pie de margen y el mecanismo de colapso masivo de margen por inestabilidad geotécnica asociada a falla plana. La estabilidad de la margen es modelada definiendo un factor de seguridad, expresado en función de la relación entre la fuerza resistente y la fuerza desestabilizadora actuantes sobre el bloque de margen. Debido a las características cohesivas que generalmente exhibe el sedimento de las márgenes, se contempla la influencia de la cohesión y de la fricción en las fuerzas resistentes.

El modelo se basa en una modificación del modelo de Osman y Thorne, el cual no considera el efecto del contenido de agua en la margen y no incluye la fuerza hidrostática relacionada con el nivel de agua en el río. Por lo tanto, se desarrolló un factor de seguridad generalizado que tiene en cuenta ambos efectos. Dicho factor brinda, en el caso de margen seca y presión de confinamiento nula, el mismo valor obtenido por Osman y Thorne; mientras que, para margen completamente saturada y para condiciones de saturación intermedia se obtienen valores definitivamente menores. Se derivó además una expresión para calcular el volumen sólido que ingresa al curso de agua lateralmente como consecuencia del colapso masivo de margen y otra para calcular el correspondiente incremento de ancho de la sección transversal.

2.2.1 Implementación del modelo hidráulico HEC - GeoRAS en la modelación hidráulica del sistema para el control de inundaciones de los ríos Cañar y Bulubulu

El presente estudio se realizó en vista de la necesidad de conocer el comportamiento hidráulico de los ríos de la costa vinculados al Proyecto Bulubulu - Cañar, mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS), conjuntamente con el Hydrologic Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS). Básicamente es la incorporación del módulo GEO al HEC RAS para uso de información georeferenciada a partir de la cartografía existente de la zona e interacción de todo el software. Esta herramienta conocida como HEC - GeoRAS facilita y complementa el trabajo con el HEC – RAS, ya que crea un archivo para importar datos geométricos del terreno, incluyendo cauce del río, secciones transversales, etc. a dicho software. Posteriormente los resultados de calados y

velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcGIS para ser procesados y obtener mapas de inundación y zonificación de riesgo

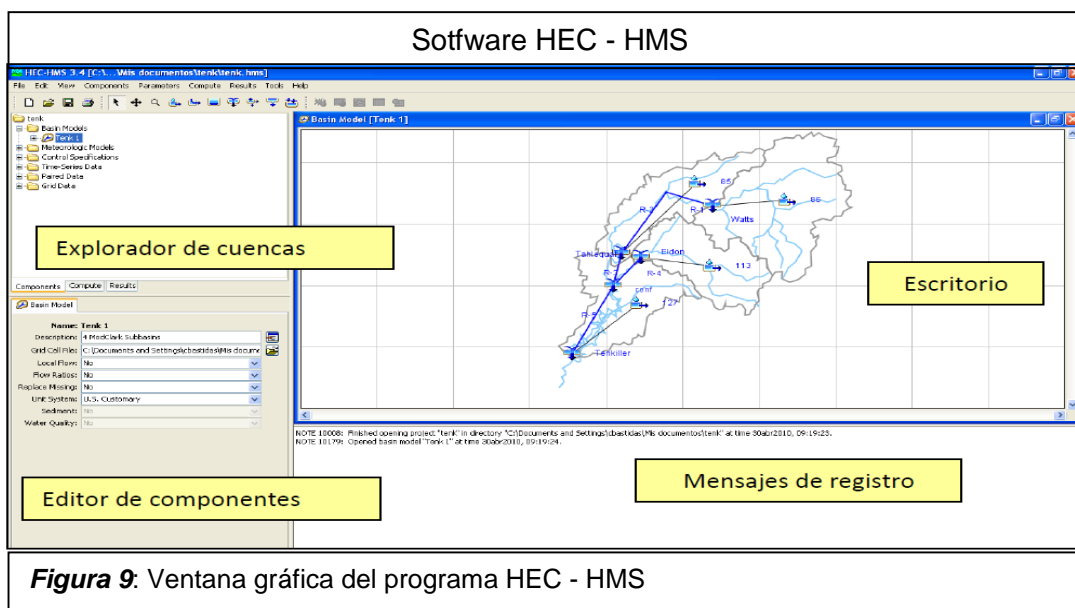


Figura 9: Ventana gráfica del programa HEC - HMS

Fuente: Proyecto FONACIT–UCV N° 2005000502: “Evaluación, Selección e Implantación de Modelos Numéricos para el Pronóstico Hidrometeorológico”.

2.3 Bases teórica científica

La principal teoría en la que se basa la presente investigación es la desarrollada por el Ing. Pedro A. Basile del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM). FCEIA. En este trabajo se presenta el desarrollo, la implementación y el análisis de sensibilidad de un modelo de erosión de márgenes, el cual contempla el efecto combinado de la erosión fluvial del lecho, la erosión fluvial lateral de pie de margen y el mecanismo de colapso masivo de margen por inestabilidad geotécnica asociada a falla plana. Debido a las características cohesivas, que generalmente exhibe el material sólido de las márgenes, se contempla la influencia de la cohesión y de la fricción en las fuerzas resistentes.

El modelo se basa en una modificación del modelo de Osman y Thorne (1988), el cual considera condición de margen seca y no contempla el efecto estabilizador de la presión hidrostática de confinamiento ejercida por el nivel hidrométrico en el curso. Por lo tanto, se desarrolló un factor de seguridad generalizado que tiene en cuenta el efecto inducido por el agua contenida en el suelo de margen y el efecto del nivel del agua en el río. En el trabajo se presenta, además, una expresión para calcular el volumen sólido que ingresa al curso de agua lateralmente debido al colapso masivo de margen y otra expresión para calcular el correspondiente incremento de ancho de la sección transversal.

La estabilidad de la margen es modelada definiendo un factor de seguridad F_s , el cual puede expresarse en función de la relación entre la fuerza resistente R y la fuerza desestabilizadora D actuantes sobre el bloque, como:

$$F_s = \frac{R}{D}$$

Ecuación 1: Factor de Seguridad

Si $F_s \geq 1$ la margen es estable y si $F_s < 1$ la margen es inestable.

La fuerza resistente R por unidad de longitud de margen puede expresarse como:

$$R = \frac{c(Z - Z_t)}{\text{sen}\beta} + N \text{tg}\phi$$

Ecuación 2: Fuerza Resistente.

Donde c es la cohesión del sedimento de margen, Z es el nivel de margen respecto al fondo erosionado, Z_t : es la profundidad de la grieta de tracción, β es el ángulo de

falla plana, N es la fuerza normal al plano de falla y ϕ es el ángulo de fricción interna del sedimento que constituye la margen.

La fuerza desestabilizadora D, actuante paralela al plano de falla y en dirección opuesta a R, queda definida mediante:

$$D = (G_b + G_a)\text{sen}\beta - (F_a - F_t)\text{cos}\beta$$

Ecuación 3: Fuerza Desestabilizadora.

Reemplazando:

$$F_s = \frac{c(Z - Z_t)}{(G_b + G_a)\text{sen}^2\beta - (F_a - F_t)\text{cos}\beta \text{sen}\beta} + \frac{N \text{tg}\phi}{(G_b + G_a)\text{sen}\beta - (F_a - F_t)\text{cos}\beta}$$

Ecuación 4: Factor de Seguridad

La fuerza N dada por:

$$N = (P + G_a)\text{cos}\beta + (F_a - F_t)\text{sen}\beta$$

Ecuación 5: Fuerza Normal al Plano de Falla

Es la componente normal, de una fuerza vertical P, transmitida sobre el plano de falla o deslizamiento por el suelo contenido en el volumen. La fuerza Gb es la fuerza asociada al peso total del mismo volumen. Reemplazando:

$$F_s = \frac{c(Z - Z_t)}{(G_b + G_a)\text{sen}^2\beta - (F_a - F_t)\text{cos}\beta \text{sen}\beta} + \frac{[(P + G_a)\text{cos}\beta + (F_a - F_t)\text{sen}\beta]\text{tg}\phi}{(G_b + G_a)\text{sen}\beta - (F_a - F_t)\text{cos}\beta}$$

Ecuación 6: Factor de Seguridad

Si se considera la margen seca P y Gb son idénticas, adoptan el mismo valor, es decir, son iguales al peso de las partículas de suelo contenidas en el volumen. En

este caso, despreciando además el efecto del nivel del agua en el curso, la ecuación queda expresada como:

$$F_s = \frac{c(Z - Z_t)}{\gamma_h V \text{sen}^2\beta} + \frac{\text{tg } \phi}{\text{tg } \beta}$$

Ecuación 7: Factor de Seguridad

2.4 Definición de la terminología

Angulo de Reposo: La máxima inclinación de tales depósitos corresponde al tamaño promedio de las rocas que lo componen.

Cauce: es el confín físico normal de un flujo de agua, siendo sus confines laterales las riberas.

Caudal de diseño: caudal máximo que se espera pueda presentarse durante la vida útil de una estructura y que se adopta para su diseño.

Cohesión: Es la atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas de una sustancia.

Colapso masivo: Surge por inestabilidad geotécnica asociada a falla plana, Debido a las características cohesivas, que generalmente exhibe el material sólido de las márgenes

Erosión: proceso por el cual la superficie de la tierra se desgasta por acción de agentes externos como agua, hielo, viento, variaciones térmicas, organismos vivos o el hombre. Este proceso incluye la meteorización, que no implica transporte de material.

Erosión local: Se explica por la acción de un flujo complejo que posee fuerte turbulencia y puede desarrollar grandes vórtices.

Erosión potencial: Pronóstico de pérdida de material en un suelo como consecuencia de la influencia del relieve, la erodibilidad de los suelos y la erosividad de las lluvias. Supone el territorio desprovisto de cubierta vegetal protectora homogénea. Se expresa en unidades similares a la de los conceptos anteriores.

Falla plana de un talud: Asociado a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad del talud.

HEC – RAS: es una aplicación que modela el flujo del agua en ríos y canales, unidimensional y fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, para controlar ríos, puertos.

Inundación: acumulación de agua causada por: lluvias intensas sobre áreas planas; deficiencias de drenaje; desbordamiento de corrientes naturales.

Medidas de control fluvial: acción o estructura que sirve para prevenir problemas de erosión, socavación o sedimentación.

Puente: es una construcción que permite salvar un accidente geográfico como un río, un cañón, un valle, un camino, una vía férrea, un cuerpo de agua o cualquier otro obstáculo físico

Software: Es aquel que permite a los usuarios llevar a cabo una o varias tareas específicas, en cualquier campo de actividad susceptible de ser automatizado o asistido, con especial énfasis en los diversos campos, en este caso el campo de la hidráulica.

Talud: Designa la acumulación de fragmentos de roca partida en la base de paredes de roca, acantilados de montañas, o cuencas de valles

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo y diseño de la investigación

Tipo de investigación fue Cuantitativa

Diseño de la investigación fue Cuasi - experimental.

3.1.1 Planteamiento de la solución

<i>Tabla 1</i>		
PROBLEMA	SOLUCIÓN	REALIDAD
Falta de estudios comparativos para determinar adecuadamente la erosión de cauces en ríos.	Realizar un análisis del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión de un cauce en las inmediaciones del puente Pucalá.	a. Mejorar las condiciones geométricas de un cauce aplicando novedosos métodos.
		b. Mejorar las condiciones de calidad de vida y el cuidado del medio ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Población y muestra

La población y la muestra fue el puente Pucalá (márgenes del cauce en la inmediaciones del Puente Pucalá).

3.3 Hipótesis

El modelo de la erosión del cauce que se puede estudiar, comparar y aplicar al cauce en las inmediaciones del Puente Pucalá fue basado en el análisis del colapso masivo asociado a la falla plana.

3.4 Variables

Variable única: Modelo de erosión del cauce por mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana.

3.5 Operacionalización:

3.5.1 Variable única

Tabla 2

VARIABLE UNICA	DIMENSION	INDICADORES	INDICE	SUB INDICADORES	INDICE	TECNICAS DE RECONEXION DE INFORMACION	INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE INFORMACION	INSTRUMENTOS DE MEDICION
PUENTE PUCALA	MARGENES EN LAS INMEDIACIONES DEL PUENTE	Caudal	m ³ /s	Precipitaciones máximas anuales	m	Análisis de Documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Software HEC – HMS
				Tirante hidráulico	mm	Análisis de Documentos	Guía de análisis y documentos	Software HEC – RAS
				Área hidráulica	m	Análisis de Documentos	Guía de análisis y documentos	Software HEC – RAS
				Pendiente y cotas	mm	Observación y análisis de documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Levantamiento Topografico
				Rugosidad	Adimensional	Observación y análisis de documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Visitas de campo
				Radio Hidráulico	m	Análisis de Documentos	Guía de análisis y documentos	Software HEC – RAS
		Geometría del río	m	Ancho del Cauce	m	Observación y análisis de documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Levantamiento Topografico y Software HEC – RAS
		Transporte de sedimentos	m m	Distribución de las partículas	mm	Observación y análisis de documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Recoleccion de datos y muestra de suelos en el lugar
		Tipo de suelo	Clasificación SUCS	Curva Granulométrica	mm	Observación y análisis de documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Recoleccion de datos y muestra de suelos en el lugar
		Niveles de erosión del cauce	m	-----	-----	Observación y análisis de documentos	Guía de análisis de documentos y recolección de datos	Software HEC – RAS

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Métodos, técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.6.1 Métodos de investigación

Deductivo.

Porque después de haber definido la variable única y sus parámetros, se contrastó la hipótesis para un adecuado análisis del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana en el cauce del puente Pucalá, llegándose a determinar las principales zonas más vulnerables en las inmediaciones del puente.

El método deductivo permite que las verdades particulares contenidas en las verdades universales se vuelvan explícitas. (Aranzamendi Lino)

Inductivo: Porque después de haber logrado con éxito conocer las características topográficas, el estudio de mecánica de suelos, el comportamiento hidrológico e hidráulico, se determinó la erosión del cauce en el puente Pucalá.

La inducción, como método científico, es una forma de raciocinio o argumentación, en tal consideración, compromete un análisis ordenado, coherente y lógico del problema de investigación, tomando como referencia premisas verdaderas. (Bacon)

Análisis: Porque se analizó el objeto de estudio, siendo para la presente tesis el puente Pucalá y sus márgenes, conociendo a partir de los resultados que se obtuvieron sus riesgos y ventajas.

Metódicamente, el análisis es la operación intelectual que considera en considerar por separado las partes de un todo. Las nociones de parte y todo son correlativas. El todo supone las partes, las partes supone el todo. (René Descartes)

Síntesis: Porque una vez analizada la situación actual en el puente Pucalá se planteó una solución viable para disminuir la erosión progresiva y constante en las márgenes.

A la síntesis, se le considera como un método de demostración que procede de los principios a las consecuencias, de las causas a los efectos. Es la reunión de los elementos de un todo. Empero, hay quienes considera que la síntesis no es propiamente un método, sino un mera instancia de objetivos sometido ante al análisis, en la cual se tiene en cuenta las claridades allegadas analíticamente. Para que la visión sintética sea completa, debe haber sido completamente también la reducción analítica. El análisis propiamente dicho considera lo que está presente en el objeto. (Romero, Francisco y Pucciarelli, Eugenio, Cit., pp. 154-156)

3.6.2 Técnicas de recolección de datos

Para un adecuado análisis del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana, tal y como se mencionó anteriormente se consideró un caso real de un puente: puente Pucalá, para ello se siguió una serie de procedimiento, los cuales se describen de manera general a continuación:

1. Obtención de información de las entidades pertinentes:

- Recopilación y Evaluación de la información necesaria que implicó el buen desarrollo de la presente investigación.
- Información topográfica del cauce del Río en la zona de influencia, considerada en el estudio.
- Estudio de mecánica de suelos, que incluye la cimentación del puente y el cauce del río a lo largo del tramo en estudio.

- Planos de detalle del Puente (puente Pucalá), en la que se tenga el levantamiento de la estructura existente, con los niveles de la losa, elementos de apoyo, tanto pilares como estribos y su sección principal.

2. Visita de campo y recolección de información en el sitio del puente:

- De las máximas avenidas del río y su respectivo análisis para diferentes períodos de retorno, se consideró para ello el uso del programa HEC – HMS, el cual desarrolla un modelamiento hidrológico a partir del proceso precipitación – escorrentía, el cual a su vez refleja el comportamiento real de toda la cuenca en estudio y sobretodo la influencia en la zona del puente Pucalá.

- Determinación de las características y parámetros hidráulicas del río asociadas a la velocidad, ancho superficial, energía específica y tipo de flujo.

- Descripción de estructuras u obras de control próximas al sitio del puente.

- Determinación de los parámetros más importantes de los materiales del cauce como su rugosidad y pendiente.

3. Se aplicaron las ecuaciones correspondientes basadas en el mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana al puente Pucalá según lo descrito en la base teórica, con la previa contrastación del programa HEC – RAS para el análisis bidimensional de los perfiles de flujo, velocidades y demás parámetros necesarios.

4. Se evaluaron los resultados obtenidos y se realizaron las comparaciones necesarias entre los programas empleados para una buena correlación de resultados.

5. Finalmente se propondrán algunas medidas de solución según los resultados que han obtenido.

3.6.3 Descripción de los instrumentos utilizados

Los materiales y equipos que se emplearon fueron los necesarios que implicó la presente investigación:

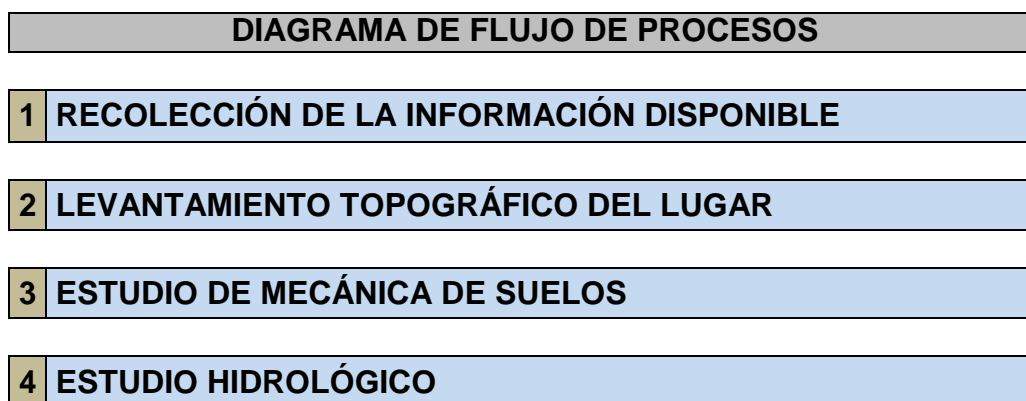
- Equipos para el estudio de suelos.
- Equipos topográficos.
- Programa HEC RAS v.4.0, HEC – HMS v 3.5. y SOCAVA.

Se emplearán los siguientes formatos:

- Formato para el estudio y ensayos de suelos.
- Formato para el estudio de topográfico.
- Formato para la obtención de los datos hidrológicos e hidráulicos.
- Formato para la recolección de datos del programa HEC – HMS, HEC – RAS y SOCAVA

3.7 Procedimiento para la recolección de datos

3.7.1 Diagrama de flujo de procesos



5 ESTUDIO HIDRÁULICO

6 APLICACIÓN DEL MODELO DE MECANISMO DE COLAPSO MASIVO ASOCIADO A FALLA PLANA

7 APLICACIÓN DEL SOFTWARE HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER - RIVER ANALYSIS SYSTEM (HEC - RAS)

8 ELABORACIÓN DE PLANOS Y DETALLES

3.7.2 Descripción de procesos

1. Recolección de la información disponible

Consistió en la recolección de la información disponible de estudio realizados, de las entidades respectivas como SENAMHI, Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), tesis, artículos científicos, entre otros relacionados con la presente investigación.

2. Levantamiento topográfico del lugar

El levantamiento topográfico que se requirió, abarcó el tramo involucrado donde se encuentra actualmente el puente Pucalá, además como lo indica el Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2011) se recomienda que dicho levantamiento topográfico deba comprender los siguientes aspectos:

- En ríos con amplias llanuras de inundación donde el puente produzca contracción del flujo de avenida el levantamiento abarcará 12 veces el ancho del cauce principal aguas arriba del eje propuesto y 6 veces hacia aguas abajo.

- En ríos donde el puente no produzca contracción del flujo de avenida y ofrezca una pendiente pronunciada el levantamiento topográfico abarcará 8 veces el ancho del cauce principal aguas arriba del eje propuesto y 4 veces hacia aguas abajo. El levantamiento topográfico no debe ser menor a 150 m aguas arriba y 150 m aguas abajo del eje del puente propuesto.

- En caso que el eje del puente propuesto se ubique cerca de la desembocadura con un río principal, lago o mar el levantamiento topográfico deberá incluir la zona de confluencia.

Sin embargo, el requerimiento mínimo para el levantamiento topográfico puede extenderse o limitarse, sin perjudicar los objetivos del proyecto. Entonces, se recomienda que el levantamiento topográfico debe incluir la estructura existente, niveles de agua actuales, marcas de agua en la estructura existente, toma del perfil longitudinal del curso natural, secciones transversales del curso natural espaciados no mayor a 0.5 veces el ancho del cauce principal del curso natural y otros aspectos y/o singularidades de relevancia para el estudio hidráulico, teniendo en cuenta además la forma irregular que generalmente presentan las secciones transversales de los cauces naturales, el levantamiento topográfico deberá representar la zona en estudio adecuadamente de tal manera que permita identificar puntos altos, bajos e irregularidades del lecho como islotes, zonas de depresión asociadas a socavación, etc.

3. Estudio de mecánica de suelos

El estudio de Mecánica de Suelos consistió principalmente en determinar las características principales del suelo como el tipo de suelo y distribución granulométrica en función al diámetro, para ello se tamizaron las muestras extraídas, luego se clasificaron y se obtuvieron los resultados los cuales se detallan en el anexo de la presente investigación.

Además en el área en el cual se ubica el “Puente Pucalá” dará lugar a una configuración estratigráfica particular con unidades características bien diferenciadas y definidas, es decir ésta conformada por suelos del tipo arenoso con presencia de limos y arcillas.

4. Estudio hidrológico

El estudio Hidrológico se basó en dos aspectos importantes el primero está referido al análisis de la información pluviométrica que consistió en la recolección de datos de las precipitaciones máximas de las estaciones de la Cuenca el Río Chancay.

Luego se procedió a estimar los datos faltantes de las precipitaciones máximas de las estaciones pluviométricas, para ello se empleó el método de los promedios, escogiéndose como estaciones índices a Lambayeque, Huambos y Chugur por ser todas las estaciones cercanas unas de otras y por su consistencia de los datos que se han registrado. Finalmente respecto al análisis de la información pluviométrica, se realizó el ajuste respectivo con las distribuciones de Gumbel Tipo I y de

Logaritmo Pearson Tipo III, para los diferentes períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

El segundo aspecto importante es el referido al análisis de la información hidrométrica que se basa en las descargas generadas por el río Chancay, pues éste experimenta notables crecidas entre los meses de diciembre a marzo y especialmente los registros de los eventos extraordinarios como el fenómeno “El Niño” producto de las precipitaciones pluviales en las partes altas de la cuenca, la cual tuvo un incremento significativo respecto al promedio de los últimos 30 años, alcanzando caudales de 600 m³/s y 1998 m³/s para los años 1983 y 1998 respectivamente.

Para obtener los caudales máximos para diferentes períodos de retorno se emplearon los métodos estadísticos que se basan en considerar que el caudal máximo anual es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución asociada a una probabilidad empírica. Para utilizarlos se requiere tener como datos, el registro de caudales máximos anuales, cuanto mayor sea el tamaño de registro, mayor será también la aproximación del cálculo del caudal de diseño, el cual se estima para un determinado período de retorno. Los métodos estadísticos que se emplearon fueron los métodos de Nash, Lebediev, Logaritmo Pearson III y Gumbel, obteniéndose caudales para los períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

También para obtener los caudales máximos para diferentes períodos de retorno se empleó un modelo de simulación con el programa Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System (HEC – HMS v.3.50). El procedimiento de análisis

para la simulación se basa principalmente en los aportes que recibe el curso principal (Río Chancay) en zonas altas a más de 2000 m.s.n.m. como Llama, Chugur, Quilcate, Santa Cruz y Huambos, pues las estaciones que se encuentran en estas zonas son las que registran precipitaciones altas, en comparación con las estaciones que se encuentran en menor altitud y muy cerca a las costas del Océano Pacífico, pero que sin embargo en épocas de máximos eventos como el ocurrido en 1998 (Fenómeno del Niño) aumentaron considerablemente su registro en ese año.

5. Estudio hidráulico

Tras la obtención del cálculo de caudales, para los diferentes periodos de retorno analizados, se procedió a elaborar el modelo hidráulico de simulación del flujo. El resultado de la aplicación de los caudales de cálculo al modelo hidráulico permitió establecer la determinación de los niveles alcanzados por el flujo y las velocidades del Río Chancay en la zona del Puente Pucalá, la longitud de análisis fue de 1000 m., con un ancho de aproximadamente 300 metros en promedio. La metodología que se siguió consistió en la construcción de un modelo hidráulico unidimensional en régimen mixto que asocie el cauce. Este modelo ha de recoger adecuadamente las características de su funcionamiento hidráulico adaptadas a la hipótesis de cálculo (unidimensionalmente y en régimen permanente). La modelización se realizó utilizando el programa Hydrologyc Engineering Center – River Analysis System (HEC – RAS v.4.00) del U.S. Army Corps of Enginners. Sobre el modelo del cauce actual del Rio Chancay en el Puente Pucalá, se determinaron los niveles alcanzados por la corriente de agua para periodos de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años para todas las secciones en análisis.

Con los cálculos hidráulicos realizados se presentan luego las características hidráulicas en la sección de interés (Eje del Puente Pucalá). Así mismo se presenta un cuadro comparativo de los resultados obtenidos.

6. Aplicación del modelo de mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana

El modelo de erosión de márgenes contempla los principales procesos que gobiernan el mecanismo de colapso masivo por falla plana. El modelo incluye entre otros factores, la erosión del fondo, la erosión del pie del margen, la profundidad de la grieta de tracción, la presión de confinamiento ejercida por el nivel de agua en el río y el contenido de agua en el suelo de la margen. Este último es regulado por el nivel freático y su efecto se simula mediante un coeficiente que ajusta los pesos específicos globales promedios, asociados al volumen del bloque de margen en lo que se refiere a las fuerzas de fricción y gravedad.

7. Aplicación del software Hydrologic Engineering Center – River Analysis System (HEC – RAS)

El programa HEC RAS (River Analysis System) ha sido desarrollado por el Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers, de los Estados Unidos, siendo uno de los modelos hidráulicos más utilizados en la modelización hidráulica de cauces. El programa se descarga gratuitamente en la página web **www.hec.usace.army.mil**, donde además se puede descargarse el manual de usuario, el manual de referencia técnica y ejemplos de aplicación. Tal y como se explicó anteriormente el programa permitió simular los perfiles de flujo y perfil de

velocidades para los diferentes períodos de retorno en condiciones de régimen mixto para evaluar las condiciones en flujo subcrítico y supercrítico.

8. Elaboración de planos y detalles

Los planos y detalles se han elaborado en función a los resultados obtenidos con la presente tesis de investigación, además del plano de ubicación y detalles de elevación del puente.

3.7.3 Equipos, materiales e instrumentos

Equipos:

- Estación Total
- Trípode.
- Jalones.
- GPS.

Materiales:

- Suelo en las inmediaciones del Puente Pucalá

Instrumentos

- Programa HEC - RAS v.4.00.
- Programa HEC – HMS v.3.5.
- Programa AUTOCAD 2010.
- Programa MICROSOFT EXCEL 2010.
- Programa MICROSOFT WORD 2010.

3.7.4 Recursos humanos

Personal	Número
Ingeniero civil	1
Ingeniero especialista en Hidráulica	2

3.7.5 Planos

Se dibujaron los planos respectivos del puente Pucalá utilizando el software Autocad 2010, los planos corresponden a la ubicación del puente y vistas en planta, perfil Longitudinal del tramo en estudio, plano de la sección principal del puente y secciones transversales aguas arriba y aguas abajo.

3.7.6 Normatividad

<i>Tabla 2</i>																											
3.8	<table border="1"> <thead> <tr> <th>NORMA TÉCNICA</th> <th>CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>E.030</td> <td>DISEÑO SISMO RESISTENTE</td> </tr> <tr> <td>E.050</td> <td>SUELOS Y CIMENTACIONES</td> </tr> <tr> <td>E.060</td> <td>CONCRETO ARMADO</td> </tr> <tr> <td>BUREAU OF RECLAMATION</td> <td>OFICINA DE RECLAMACIÓN DEL AGUA.</td> </tr> <tr> <td>ANA</td> <td>AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA.</td> </tr> <tr> <td>NORMA DE SEGURIDAD E HIGIENE</td> <td>CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS</td> </tr> <tr> <td>G.050</td> <td>SEGURIDAD DURANTE LA CONSTRUCCIÓN</td> </tr> <tr> <td>NORMA AMBIENTAL</td> <td>CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS</td> </tr> <tr> <td>ISO 14001 (INTERNACIONAL)</td> <td>ESPECIFICACIONES PARA LOS SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL</td> </tr> <tr> <td>LEY N° 28611</td> <td>LEY GENERAL DEL AMBIENTE</td> </tr> <tr> <td>LEY N° 17752</td> <td>LEY GENERAL DE AGUAS</td> </tr> <tr> <td>LEY N° 27314</td> <td>LEY GENERAL DE RESIDUOS SOLIDOS</td> </tr> </tbody> </table>	NORMA TÉCNICA	CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS	E.030	DISEÑO SISMO RESISTENTE	E.050	SUELOS Y CIMENTACIONES	E.060	CONCRETO ARMADO	BUREAU OF RECLAMATION	OFICINA DE RECLAMACIÓN DEL AGUA.	ANA	AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA.	NORMA DE SEGURIDAD E HIGIENE	CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS	G.050	SEGURIDAD DURANTE LA CONSTRUCCIÓN	NORMA AMBIENTAL	CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS	ISO 14001 (INTERNACIONAL)	ESPECIFICACIONES PARA LOS SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL	LEY N° 28611	LEY GENERAL DEL AMBIENTE	LEY N° 17752	LEY GENERAL DE AGUAS	LEY N° 27314	LEY GENERAL DE RESIDUOS SOLIDOS
NORMA TÉCNICA	CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS																										
E.030	DISEÑO SISMO RESISTENTE																										
E.050	SUELOS Y CIMENTACIONES																										
E.060	CONCRETO ARMADO																										
BUREAU OF RECLAMATION	OFICINA DE RECLAMACIÓN DEL AGUA.																										
ANA	AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA.																										
NORMA DE SEGURIDAD E HIGIENE	CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS																										
G.050	SEGURIDAD DURANTE LA CONSTRUCCIÓN																										
NORMA AMBIENTAL	CANAL DE RIEGO Y OBRAS COMPLEMENTARIAS																										
ISO 14001 (INTERNACIONAL)	ESPECIFICACIONES PARA LOS SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL																										
LEY N° 28611	LEY GENERAL DEL AMBIENTE																										
LEY N° 17752	LEY GENERAL DE AGUAS																										
LEY N° 27314	LEY GENERAL DE RESIDUOS SOLIDOS																										

Análisis estadístico e interpretación de los datos

3.8.1 Enfoque cualitativo

Se examinaron las guías de análisis de documentos obtenidos de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán, del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), del SENAMHI, y otras relacionadas al presente estudio.

3.8.2 Enfoque cuantitativo

Se utilizó la estadística descriptiva y se aplicó promedios, valores máximos y mínimos, desviación estándar, y demás otros sugeridos por los métodos estadísticos para determinar los caudales máximos, así mismo se utilizó el software Microsoft Excel y el software Microsoft Project, para procesar los datos, tabularios y contrastarlos.

3.9 Criterios éticos

3.9.1 Ética de la recolección de datos

La aplicación de los formatos para estudios de mecánica de suelos está basada en la norma E.050. El recojo de datos topográficos cuenta con instrumentos calibrados y actualizados, siendo plasmados en los formatos de nivelación y taquimetría.

Se contó con base teórica actualizada y confidencial que permitió recopilar la información topográfica del tema en estudio. Se respetará la norma técnica peruana (N.T.P.) para la recolección de muestras de campo del estudio de mecánica de suelos.

3.9.2 Código ético de la profesión

Capítulo III

Sub Capítulo I

DE LA RELACIÓN CON LA SOCIEDAD

Artículo 99.- Los ingenieros cuidarán que los recursos humanos, económicos, naturales y materiales, sean racional y adecuadamente utilizados, evitando su abuso o dispendio, respetarán y harán respetar las disposiciones legales que garanticen la preservación del medio ambiente.

Artículo 100.- Los ingenieros ejecutarán todos los actos inherentes a la profesión de acuerdo a las reglas técnicas y científicas procediendo con diligencia; autorizarán planos, documentos o trabajos solo cuando tengan la convicción de que son idóneos y seguros, de acuerdo a las normas de Ingeniería.

Artículo 103.- Los ingenieros están obligados a cuidar el territorio de trabajo de la ingeniería peruana y fomentar el desarrollo tecnológico del Perú.

Sub Capítulo II

DE LA RELACIÓN CON EL PÚBLICO

Artículo 106.- Los ingenieros, al explicar su trabajo, méritos o emitir opiniones sobre temas de ingeniería, actuarán con seriedad y convicción, cuidando de no crear conflictos de intereses, esforzándose por ampliar el conocimiento del público a cerca de la ingeniería y de los servicios que presta a la sociedad.

Artículo 107.- Los ingenieros no participarán en la difusión de conceptos falsos, injustos o exagerados acerca de la ingeniería en la actividad pública o privada, de proyectos, productos, métodos o procedimientos relativos a la ingeniería.

Sub Capítulo III

DE LA COMPETENCIA Y PERFECCIONAMIENTO DE PROFESIONAL

Artículo 109.- Los ingenieros realizarán trabajos de ingeniería solamente cuando cuenten con estudios o experiencia en el campo específico de la ingeniería de que se trata.

Artículo 110.- Los ingenieros podrán aceptar trabajos que requieran estudios o experiencias ajenos a los suyos, siempre que sus servicios se limiten a aquellos aspectos para los cuales están calificados, debiendo los demás ser realizados por asociados, consultores o empleados calificados.

Artículo 111.- Los ingenieros autorizarán planos, documentos o trabajos sólo cuando hayan sido elaborados por ellos, o ejecutados bajo su control.

Sub Capítulo IV

DE LA PROMOCIÓN Y PUBLICIDAD

Artículo 115.- Los ingenieros podrán hacer promoción de sus servicios profesionales sólo cuando ella no contenga lenguaje jactancioso o engañoso o en cualquier forma denigrante de la profesión. En la promoción que realicen los ingenieros se abstendrán de garantizar resultados que por razones técnicas, económicas o sociales sean de imposible o dudoso cumplimiento.

3.9.3 Criterios de rigor científico

a. Fiabilidad

Todos los estudios a realizar en dicho proyecto, son confiables en la medida en la que la población es real, se cuente con equipos calibrados y aptos para recolección de datos lo que nos da la seguridad en la veracidad de los resultados.

b. Replicabilidad

El diseño y modelación de nuestro proyecto en estudio es supeditado a diversos factores que van a contribuir con los resultados a obtener.

c. Factores tecnológicos

Si se cuenta con los equipos adecuados para los ensayos en el Laboratorio de Suelos de la Universidad Señor de Sipán. Dicha investigación está supeditada a repetición, pero tomando en cuenta el objetivo general y los objetivos específicos.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 Resultados en Tablas y Gráficos

4.1.1 Estudio hidrológico

4.1.1.1 Descripción general de la cuenca del río Chancay

La cuenca hidrográfica del Río Chancay – Lambayeque, se ubica en el norte del Perú, políticamente su territorio corresponde a los departamentos de Lambayeque y Cajamarca. Limita por el Norte con la cuenca del Río La Leche, por el sur con la cuenca del Río Jequetepeque – Zaña, por el este con la cuenca del Río Chotano y por el oeste con el Océano Pacífico. El área de drenaje de la cuenca que se delimitó adecuadamente es de 5404.18 Km².

El río Chancay pertenece a la vertiente del Pacífico, es de régimen irregular y está conformado por los ríos Tacamache y Perlamayo que nacen en la Cordillera Occidental de los Andes; desde sus nacientes hasta su desembocadura en el mar, su longitud es de 170.00 Km; en su recorrido recibe aportes eventuales principalmente de los ríos Cañad, San Lorenzo, Cirato y Cumbil.

En la zona alta es de topografía muy accidentada, de pendientes fuertes. La agricultura de esta zona es en base a lluvias, con cultivos de maíz, menestras, yuca, papa, olluco y en los valles templados se cultivan frutales. La producción en esta zona es autoconsumo; en algunas zonas existen pequeñas obras de riego.

La zona baja del valle, que actualmente constituye el área irrigada, es de topografía ligeramente plana y con desarrollo agrícola en base a los cultivos de arroz, caña de azúcar, maíz, menestras y frutales diversos. La agricultura es básicamente de riego, para lo cual se ha construido obras hidráulicas como el Reservorio Tinajones,

Bocatoma Racarrumi, Canal Alimentador, Canal Taymi y el Sistema de Drenaje. El río Chancay, al pasar cerca del distrito de Pucalá, ofrece un cauce de ancho variable entre los 120.00 m y 500.00 m, con áreas que han sido aprovechadas por los lugareños para fines agrícolas. A través de su recorrido dicho río atraviesa zonas de configuración llana, a semiplano propios de la zona costera en cuyos suelos predominan limos y arenas finas.

El clima es cálido y seco, las precipitaciones pluviales son escasas manifestándose generalmente en forma de garúa. La temperatura del aire en la cuenca es variable, así se tiene que en la estación Lambayeque el promedio anual es de 21°C y en Tinajones es de 23°C los valores mínimos registran un promedio anual de 17.9°C en Lambayeque, 18.3°C en Tinajones y 11°C en Huambos; en tanto que los promedios máximos anuales alcanzan los 25.8°C en Lambayeque y 29.9°C en la estación Tinajones, cuyo promedio máximo mensual en el mes de marzo es de 31.6°C.

La humedad relativa en el área del Proyecto, principalmente en la parte correspondiente al departamento de Lambayeque es alta. Además la precipitación pluvial en la cuenca del Valle Chancay – Lambayeque es muy variable, dependiendo a la zona y época del año, estas se concentran en los meses de verano, enero a abril, para la zona de la cuenca alta.

El clima en el área del puente puede ser definido como de calor intenso en el día y que disminuye en la noche produciendo cierta sensación de frío; así mismo durante tempranas horas de la mañana se torna nublado. En la faja costanera (Chiclayo),

el clima es de tipo desértico subtropical, donde las temperaturas promedio oscilan entre los 19° y 23°, con variaciones de tipo seco y cálido a semicálido.

La cuenca del río Chancay presenta una hidrografía irrigada principalmente con los aportes de las aguas superficiales transportadas por los ríos que tienen su origen en las partes alta y media de la cuenca; éstas a su vez alimentan a los acuíferos subterráneos en toda la cuenca. El principal río es el Chancay, al que se agregan los aportes de los ríos Chotano, Conchano y Cumbil, para lograr una masa promedio anual de 970 millones de metros cúbicos. El agua subterránea es extraída aproximadamente mediante 648 pozos tubulares de los cuales es posible que sólo se mantengan operativos el 25%, que explotan una masa anual de aproximadamente 120 a 150 millones de metros cúbicos. Otra fuente que se considera para la irrigación de la parte baja del valle son las aguas de retorno (filtraciones en los canales y ríos) cuyo aporte es de 50 millones de metros cúbicos.

Sobre la base de planos de levantamiento topográfico se han obtenido los valores del cauce del río, tales como pendiente de fondo, ancho del cauce principal, y zona de inundación en la zona del puente, aguas arriba y aguas abajo del eje de ubicación del puente. La cartografía utilizada en este proyecto se refiere a las cartas obtenidas del “Instituto Geográfico Nacional” (IGN); a escala 1:100000, habiéndose empleado las de Chiclayo (Hoja 14 – d), Chongoyape (Hoja 14 – e) y Chota (Hoja 14 – f). A continuación se muestran las cartas nacionales que tomaron en cuenta para la delimitación de la cuenca del Río Chancay.

4.1.1.2 Pluviometría e hidrometría

Contando con un número importante de estaciones meteorológicas que disponen de información pluviométrica, como Precipitaciones máxima en 24 horas se han utilizado 16 Estaciones Pluviométrías tales como: Lambayeque, Ferreñafe, Chiclayo, Pucalá, Tinajones, Reque, Pimentel, Puchaca, Tocmoche, Llama, Huambos, Santa Cruz, Chancay Baños, Chugur, Quilcate, Cochabamba.

La precipitación Pluvial de la cuenca del Valle Chancay – Lambayeque es muy variable, dependiendo de la zona y época del año, estas se concentran en los meses de verano, enero a abril para la zona de la cuenca alta. La información del río Chancay ha sido registrada desde el año 1914 en forma continua, habiendo sido analizada a lo largo de los años por diferentes Instituciones. Actualmente ETECOMSA tiene a su cargo la operación y registro de la estación Chancay, la información prácticamente sin interrupciones.

Se dispone también de información de las cuencas Llaucano, Conchano y Chotano, la cual han sido registradas con regularidad desde 1958.

4.1.1.3 Estación Carhuaquero – Racarrumi del Río Chancay

Esta estación inicio su operación en el año 1914, en la sección denominada la Puntilla, destruida en el año 1925; se trasladó a la sección Carhuaquero en 1925 y finalmente la información se registra en la Bocatoma Racarumi, desde 1966 a la fecha. Las descargas registradas en la estación Carhuaquero – Racarumi, están influenciadas por la derivación de las aguas del Río Chotano al Chancay. Los caudales máximos registrados en el Río Chancay durante los eventos

extraordinarios de 1983 y 1998 se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 3

Caudales máximos registrados	
CAUDALES MAXIMOS REGISTRADOS DURANTE EL FENOMENO DEL NIÑO EN EL RIO CHANCAY	
AÑO	CAUDAL MAXIMO (m ³ /s)
1983	600.00
1998	1996.00

Los caudales máximos promedio anuales de la estación Carhuaquero – Racarumi en el Río Chancay, tiene una longitud de 97 años entre 1914 y 2014 (ver cuadro anterior). Para los propósitos de la presente tesis se utilizará sólo los registros tomados de la Bocatoma Racarumi por ser considerados como datos de consistencia para el respectivo análisis (1966 – 2014). Las características de la estación Racarumi se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 4					
Características de la estación hidrométrica analizada					
UBICACIÓN Y CARACTERISTICAS DE LA ESTACION HIDROMETRICA ANALIZADA					
ESTACION	REGISTRO	LATITUD	LONGITUD	ALTURA	PERIODO
Racarrumi	Hidrométrica	6°38' S	79°19' S	250 m. s. n. m.	1966 - 2014

Fuente: Proyecto Especial Olmos - Tinajones.

En el año 1998 los agricultores de la zona manifestaron que hubo un caudal superior a 2000 m³/s en Puntilla, pero no ha sido registrado por que rompió el muro en la mira en la Bocatoma y el agua discurrió por fuera del cauce.

Respecto a las descargas en el río en las inmediaciones del Distrito de Pucalá, éste experimenta notables crecidas entre los meses de diciembre a marzo y especialmente durante la presencia de eventos extraordinarios como el fenómeno “El Niño” producto de las precipitaciones pluviales en las partes altas de la cuenca,

la cual tuvo un incremento significativo respecto al promedio de los últimos 30 años, alcanzando caudales de 600 m³/s y 662 m³/s para los años 1983 y 1998 respectivamente.

4.1.1.4 Análisis de la información pluviométrica

Las fuentes de obtención de los datos de Precipitación, son las estaciones Pluviométricas, constituyéndose esta información en el fundamento principal de todo el análisis pluviométrico realizado, luego los resultados obtenidos están en dependencia de la cantidad de los datos disponibles. El análisis pluviométrico se desarrolló con datos correspondientes a las Precipitaciones máximas diarias anuales de las siguientes estaciones Pluviométricas:

Tabla 5					
Relación de estaciones pluviométricas de la cuenca					
N° ORDE N	ESTACION PLUVIOMETRIC A	LATITU D	LONGITU D	ALTITUD (m.s.n.m.)	Cuenca
1	LAMBAYEQUE	6° 42´ S	79° 55´W	18.00	CHANCA Y
2	FERREÑAFE	6° 38´ S	79° 47´W	67.00	CHANCA Y
3	CHICLAYO	6° 46´ S	79° 29´W	27.00	CHANCA Y
4	PUCALA	6° 45´ S	79° 31´W	85.00	CHANCA Y

5	TINAJONES	6° 40' S	79° 56' W	241.00	CHANCA Y
6	REQUE	6° 53' S	79° 52' W	21.00	CHANCA Y
7	PIMENTEL	6° 50' S	79° 59' W	4.00	CHANCA Y
8	PUCHACA	6° 21' S	79° 5' W	500.00	La Leche
9	TOCMOCHE	6° 25' S	79° 55' W	1250.00	La Leche
10	LLAMA	6° 30' S	79° 51' W	2010.00	CHANCA Y
11	HUAMBOS	6° 27' S	78° 58' W	2200.00	CHANCA Y
12	SANTA CRUZ	6° 39' S	78° 59' W	1642.00	CHANCA Y
13	CHANCAY BAÑOS	6° 34' S	78° 55' W	2700.00	CHANCA Y
14	CHUGUR	6° 40' S	78° 53' W	2154.00	CHANCA Y
15	QUILCATE	6° 49' S	78° 52' W	3100.00	CHANCA Y
16	COCHABAMBA	6° 28' S	79° 50' W	2800.00	CHANCA Y

Fuente: Proyecto Especial Olmos - Tinajones

El análisis está orientado a encontrar la distribución de frecuencias de valores extremos que más se ajuste a los datos observados para cada estación, obteniéndose los resultados de acuerdo al comportamiento de la serie de datos de cada estación. Este análisis incluye los valores extremos de los años extraordinarios de 1983 y 1998. Cabe señalar que cuando se trata de estaciones Pluviométricas ubicadas en la costa se registran valores de precipitación muy altos en años donde ocurre el Fenómeno del Niño en comparación con los años normales. Esta situación no es muy marcada en aquellas estaciones ubicadas en zonas altas, ya que en estas zonas las precipitaciones que se registran en años normales no muestran una marcada diferencia respecto a los valores de precipitación de avenidas extraordinarias como las del Fenómeno del Niño. El registro que se ha tomado en cuenta para la presente tesis es desde el año 1965 al 2014. De acuerdo a los resultados obtenidos, presentamos en los siguientes cuadros comparativos las precipitaciones para los dos métodos analizados, para diferentes años de periodo de retorno:

Tabla 6										
ESTACION	DISTRIBUCION DE MAYOR AJUSTE	PERIODO DE RETORNO								
		2	5	10	25	50	100	200	500	1000
LAMBAYEQUE	Log Person Tipo III	7.13	8.22	13.14	81.34	21.85	5.89	32.56	54.12	1.23
FERRENAFE	Log Person Tipo III	9.63	5.87	25.89	98.56	24.25	7.45	14.52	63.25	9.35
CHICLAYO	Log Person Tipo III	9.87	5.89	32.56	54.12	27.98	74.15	8.96	36.58	57.94
PUCALA	Gumbel Tipo I	6.54	8.96	36.58	57.94	98.32	9.87	547	98.74	58.61
TINAJONES	Gumbel Tipo I	7.45	547	98.74	58.61	78.94	63.58	213	56.98	79.45
REQUE	Log Person Tipo III	1.45	213	56.98	79.45	98.74	58.96	11.23	65.78	78.49
PIMENTEL	Log Person Tipo III	14.56	547	98.74	58.61	65.89	9.87	20.13	20.15	213
PUCHACA	Log Person Tipo III	32.56	213	56.98	79.45	32.14	63.58	98.74	58.61	547
TOCMOCHE	Log Person Tipo III	12.36	11.23	65.78	78.49	84.23	58.96	56.98	79.45	213
LLAMA	Log Person Tipo III	63.21	32.14	47.89	64.58	14.78	54.78	98.74	58.61	11.23
HUAMBOS	Log Person Tipo III	41.23	74.12	65.89	95.68	96.32	5.89	32.56	54.12	32.14
SANTA CRUZ	Log Person Tipo III	74.15	96.22	74.56	85.62	98.55	7.45	14.52	63.25	63.25
CHANCAY BAÑOS	Log Person Tipo III	9.87	5.89	32.56	54.12	5.89	2.13	8.96	36.58	57.94
CHUGUR	Log Person Tipo III	63.58	7.45	14.52	63.25	7.45	15.20	547	98.74	58.61
QUILCATE	Log Person Tipo III	58.96	5.89	32.56	54.12	5.89	74.56	213	56.98	79.45
COCHABAMBA	Log Person Tipo III	54.78	7.45	14.52	63.25	7.45	98.56	23.65	52.38	10.25

Cuadro resumen de las distribuciones de mayor ajuste de las estaciones de la cuenca del río Chancay

Fuente: Elaboración propia

Resumen de las gráficas de distribuciones

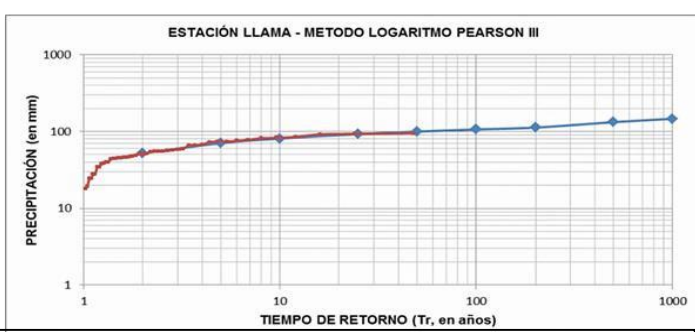
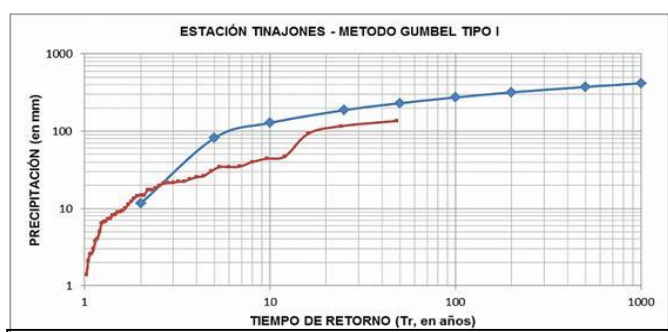
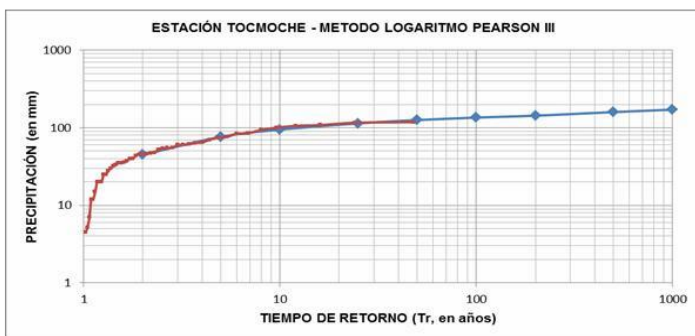
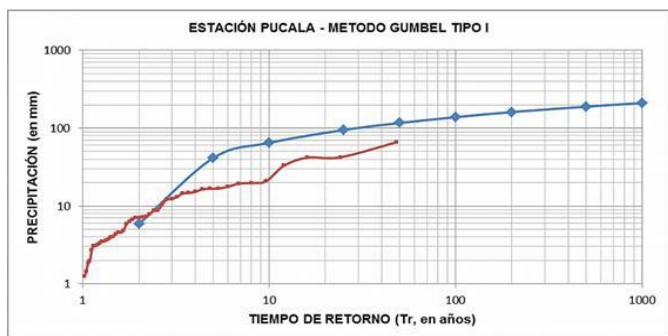
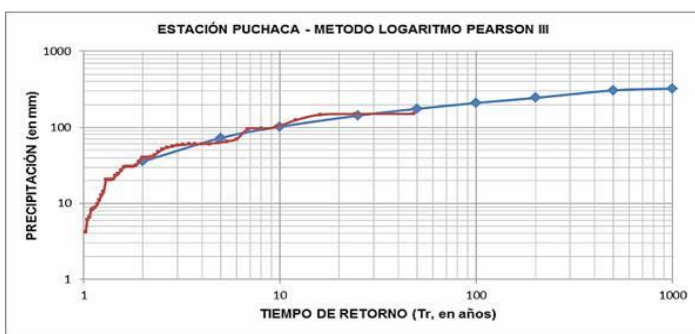
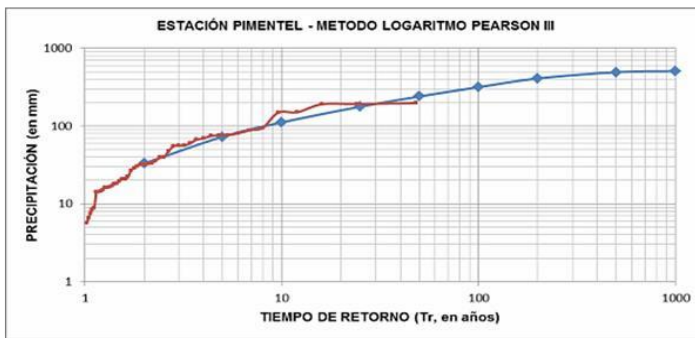
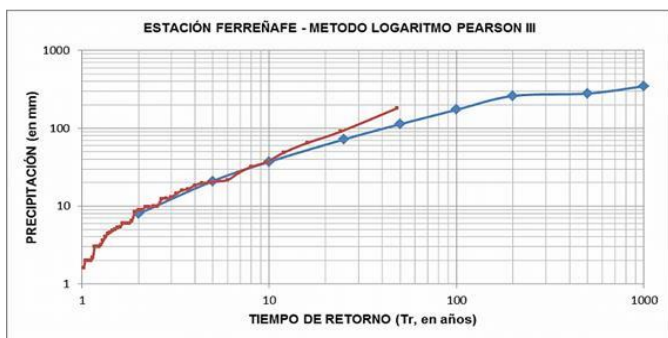
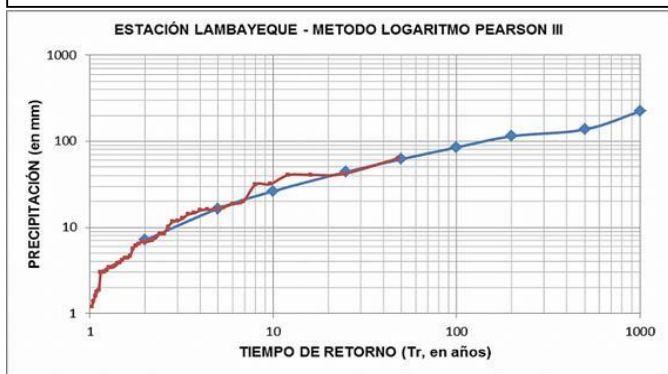


Gráfico N° 1: Resumen de las gráficas de distribuciones de mayor ajuste de las diferentes estaciones.

Fuente: Elaboración propia

4.1.1.5 Análisis de la información hidrométrica

Antes de proceder al análisis se debe contar con los caudales máximos diarios mensuales anuales del Río Chancay, debido a que no se dispone de registros de aforos de dicho río, por eso se ha recurrido a la información hidrométrica disponible histórica de las Estaciones Carhuaquero – Racarumi (1914 al 2014).

Para efectos de la presente tesis se ha utilizado solo los datos registrados en la estación Racarumi que registra las descargas del río Chancay (1966 al 2014) y con los datos de los caudales máximos se ha realizado el análisis estadístico de frecuencias con la finalidad de obtener las descargas para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1000. Estos datos también permitirán calcular los parámetros hidráulicos a definir para la evaluación hidráulica del Puente Pucalá.

4.1.1.6 Métodos para determinar los Caudales Máximos

a. Métodos Estadísticos

Los métodos estadísticos, se basan en considerar que el caudal máximo anual, es una variable aleatoria que tiene una cierta distribución. Para utilizarlos se requiere tener como datos, el registro de caudales máximos anuales, cuanto mayor sea el tamaño de registro, mayor será también la aproximación del cálculo del caudal de diseño, el cual se calcula para un determinado período de retorno. Por lo general, en los proyectos donde se desea determinar el caudal de diseño, se cuenta con pocos años de registro, por lo que, la curva de distribución de probabilidades de los caudales máximos, se tiene que prolongar en su extremo, si se quiere inferir un caudal con un periodo de retorno mayor al tamaño del registro. El problema se

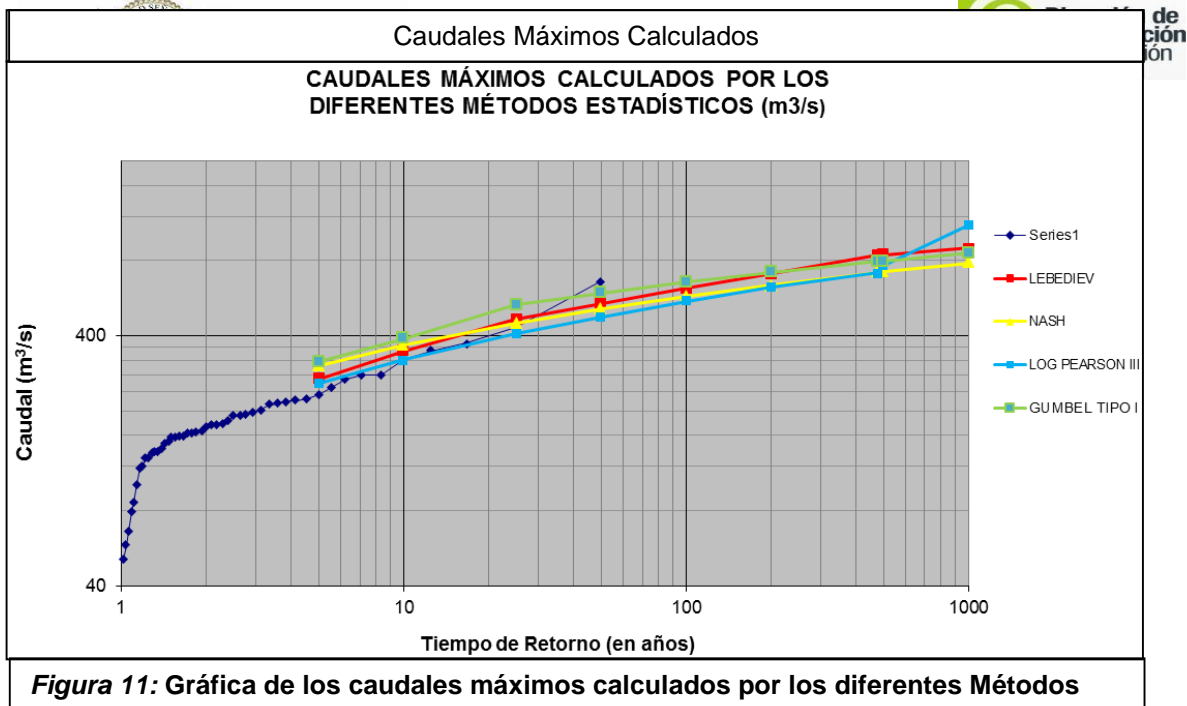
origina, en que existen muchos tipos de distribuciones que se apegan a los datos y que sin embargo, difieren en los extremos. Esto ha dado lugar a diversos métodos estadísticos, dependiendo del tipo de distribución que se considere.

También la teoría indica que Gumbel y Nash consideran una distribución de valores extremos, con la única diferencia, que el criterio de Nash es menos rígido que el de Gumbel pues permite ajustar la distribución por mínimos cuadrados. En forma práctica, se recomienda escoger varias distribuciones y ver cual se ajusta mejor; esto requiere que se tengan los datos necesarios para poder aplicar alguna prueba estadística, como la prueba de bondad de ajuste. Se presenta a continuación una tabla con los resultados obtenidos, cabe indicar que las hojas de cálculo se presentan en los respectivos anexos.

Tabla 7				
Resumen de los resultados de los métodos estadísticos aplicados.				
T (años)	METODO DE NASH	METODO DE LEBEDIEV	METODO DE LOG PEARSON III	METODO DE GUMBEL TIPO I
5	302.98	269.41	257.64	316.20
10	367.60	347.64	320.94	389.57
25	450.63	467.73	407.35	532.24
50	512.97	537.14	476.14	593.89
100	575.29	619.77	548.83	655.53
200	637.72	706.81	625.74	717.17
475	715.80	842.32	715.04	794.10
500	720.44	844.53	765.45	798.66
1000	783.16	898.51	1112.78	860.30

Fuente: Elaboración propia

En el gráfico siguiente se puede observar que la distribución que se acerca a la línea de registro es la del Método de Gumbel Tipo I, por eso se escogerá ese método, cuyos caudales se muestran en la Tabla N°5 y la gráfica de variación de los registros históricos, con respecto a los registros históricos.



b. Modelo de simulación para determinar los caudales máximos

El procedimiento de análisis para la simulación se basa principalmente en los aportes que recibe el curso principal (Río Chancay) en zonas altas a más de 2000 m.s.n.m. como Llama, Chugur, Quilcate, Santa Cruz y Huambos, pues las estaciones que se encuentran en estas zonas son las que registran precipitaciones altas, en comparación con las estaciones que se encuentran en menor altitud y muy cerca a las costas del Océano Pacífico, pero que sin embargo en épocas de máximos eventos como el ocurrido en 1998 (Fenómeno del Niño) aumentaron considerablemente su registro en ese año y de esta manera generó un caudal de 1996 m³/s en las inmediaciones del Puente Reque ocasionando la caída del mismo en ese año.

Entonces al no contar con la información hidrométrica de cada una de las quebradas de aporte a cada subcuenca (es decir que cada una de las 16 estaciones que se emplearon en el presente estudio se tomaron como subcuencas); se

procedió entonces a desarrollar un modelo de Precipitación – Escorrentía para la obtención de caudales de avenida en dichas quebradas.

Es por eso que el modelo se ha basado en dichas características ya que el programa Hidrologyc Modeling System (HMS v.3.50 para Windows) emplea las precipitaciones máximas en 24 horas para generar los caudales en los lugares de interés que se quieran analizar. También es necesario indicar que dicho programa emplea el método del Número de Curva de la Soil Conservation Service (SCS), en la actualidad Natural Resources Conservation Service, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. El nombre del método deriva de una serie de curvas, cada una de las cuales lleva el número N, que varía de 1 a 100. Un número de curva N igual a 100 indica que toda la lluvia discurre, y un número de N igual a 1 indica que toda la lluvia se infiltra, por lo que los números de curvas representan coeficientes de escorrentía. El método fue desarrollado utilizando datos de un gran número de cuencas experimentales, y se basa en la siguiente relación:

Ecuación 8: Relación $\frac{F}{S} = \frac{Q}{Pe}$ Precipitación - Escorrentía para el método del Número de Curva.

Donde:

F = es la infiltración real acumulada.

S = es la infiltración potencial máxima.

Q = es la escorrentía total acumulada.

Pe = es la escorrentía potencial o exceso de precipitación.

La ecuación principal del método se considera válida a partir del inicio de la escorrentía, donde Pe, se define como:

$$Pe = P - Ia$$

Ecuación 9: Relación para determinar la precipitación efectiva.

Mientras que F es definida como:

$$F = Pe - Q$$

Ecuación 10: Relación para determinar la infiltración real acumulada.

Luego sustituyendo estas tres últimas ecuaciones en la ecuación principal que propone el método se obtiene:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \dots(a)$$

Ecuación 11: Relación para determinar la escorrentía total acumulada.

Donde:

Q = es la escorrentía total acumulada.

P = es la precipitación.

S = es la infiltración potencial máxima.

Esta es la ecuación principal del método. El SCS después de estudiar un gran número de pequeñas cuencas, estableció una relación para estimar S a partir del número de curva N , mediante la siguiente relación:

$$S = \frac{1000}{N} - 10$$

Ecuación 12: Relación para determinar la infiltración potencial máxima

$$Q = \frac{[N(P + 50.80) - 5080]^2}{N[N(P - 203.20) + 20320]}$$

Ecuación 13: Determinación del caudal por el método de Precipitación - Esorrentía que emplea el programa HEC - HMS v.3.50.

El comportamiento en régimen natural de las subcuencas aportadoras de escurrimiento superficial, se simuló mediante la consideración de un conjunto de 16 subcuencas llamados “Subbasin” conectadas a través de líneas imaginarias del transporte de la precipitación llamados “Junction”. De esta manera estos elementos representan una adecuada homogeneidad espacial que permitieron simular las escorrentías de la red hidrográfica de la cuenca del Río Chancay. A continuación se presentan el desarrollo del esquema hidrográfico simulado con el programa HEC - HMS v. 3.50 (Gráfico N° 12), así como el resultado para un periodo de retorno de 50 años en la Estación Pucalá el cual arrojó un caudal de 1726.20 m³/s y para 100 años un caudal de 2044.90 m³/s (Gráfico N°13 y N°14 respectivamente).

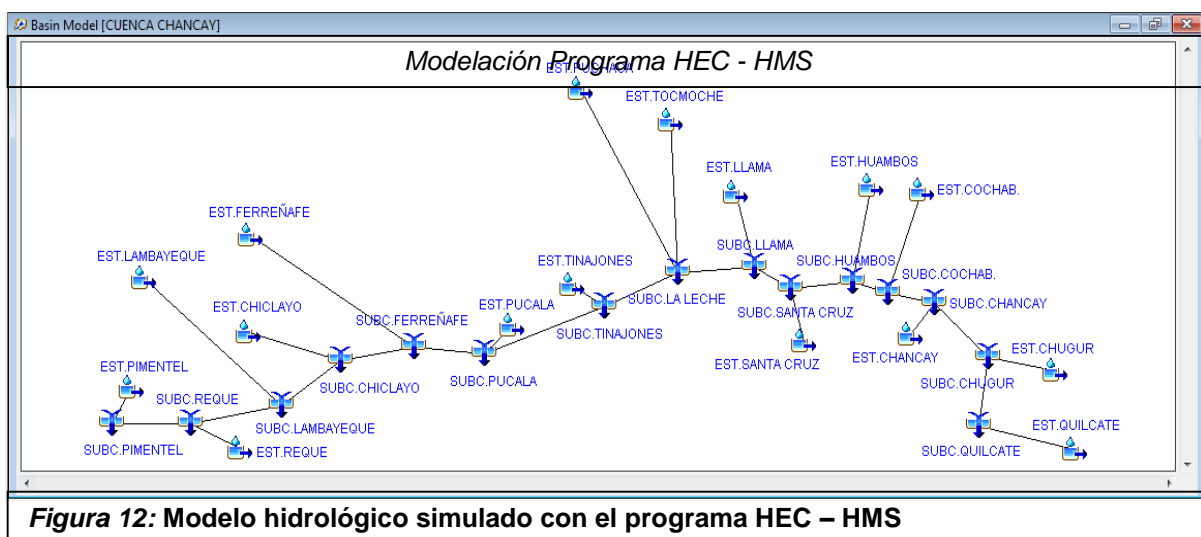
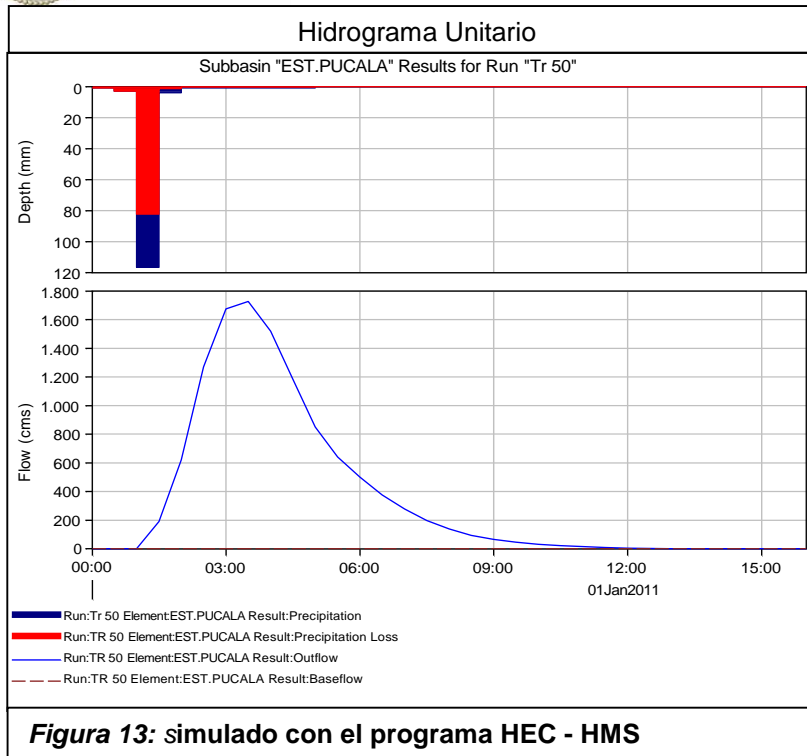
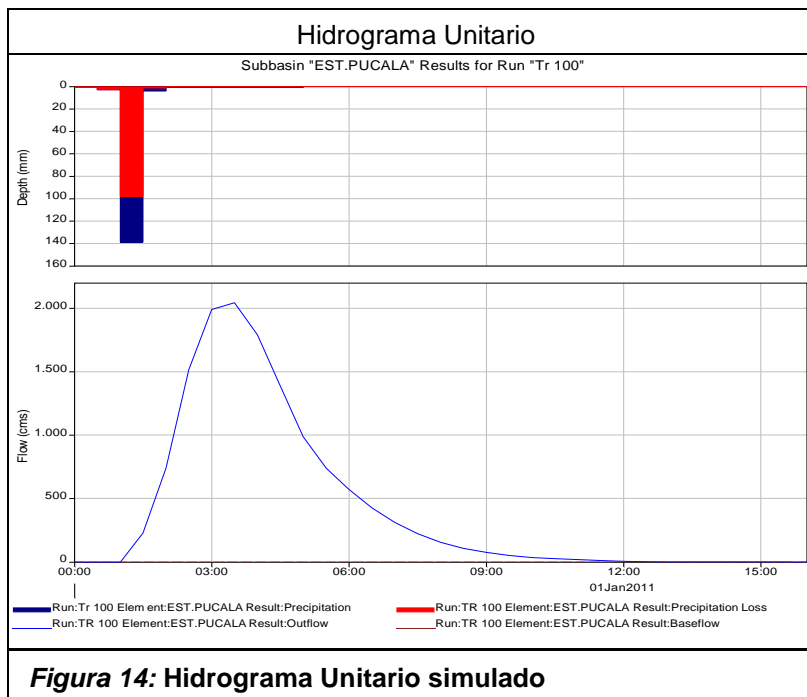


Figura 12: Modelo hidrológico simulado con el programa HEC – HMS

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 8

Resultados de los caudales para cada periodo de retorno.

ELEMENTOS HIDROLOGICOS	AREA (KM2)	5	10	25	50	100	200	500	1000
LAMBAYEQUE	56.43	448.90	489.90	822.10	1073.45	1237.9	1397.10	1726.20	1908.00
FERRENAFE	39.92	401.20	693.90	848.69	995.25	1310.54	1804.10	1912.74	1969.79
CHICLAYO	227.06	504.20	721.25	818.02	1023.90	1414.84	1912.74	1969.12	2115.43
PUCALA	176.36	628.80	756.41	923.48	1146.10	1523.78	1972.11	2075.00	2389.57
TINAJONES	510.20	610.30	789.61	948.30	1523.78	1523.78	1999.91	2237.45	2599.31
REQUE	480.79	645.40	882.19	1073.45	1800.10	1728.95	2075.01	1800.10	2675.02
PIMENTEL	523.51	656.40	832.07	995.25	1902.74	1800.10	2289.73	1956.13	3111.06
PUCHACA	190.24	718.50	950.74	1023.90	1932.14	1902.74	1810.90	1939.71	3279.61
TOCMOCHE	472.88	730.60	923.48	1146.10	1999.01	1912.74	1972.72	2015.73	3384.47
LLAMA	500.76	711.10	948.30	1523.78	2075.00	1969.12	1912.13	2289.53	3619.14
HUAMBOS	144.91	718.32	1073.45	1728.95	2189.53	2075.00	1969.99	2549.32	3779.35
SANTA CRUZ	62.76	822.10	995.25	1800.10	2222.08	2237.45	2035.00	2615.01	3824.04
CHANCAY BAÑOS	648.49	848.69	1187.95	1902.74	2378.65	1800.10	2189.53	3117.33	3911.06
CHUGUR	518.97	818.02	1104.60	1932.14	2489.74	1902.74	2589.41	3229.65	4425.63
QUILCATE	700.64	826.58	1023.90	1999.01	2465.32	1932.14	2701.45	3314.08	4312.78
COCHABAMBA	150.30	855.60	1146.10	2075.00	2511.9	1999.01	3019.80	3619.14	4674.50
TOTAL =	5404.17								

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1.7 Caudal de diseño

Mediante el estudio hidrológico se estimó los caudales para distintos períodos de retorno los cuales fueron para 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Según los métodos estadísticos para un período de retorno de 50 años, el caudal máximo sería de 593.89 m³/s, el cual es relativamente pequeño frente a los

caudales máximos producidos en la Estación Racarumi que alcanzaron de hasta aproximadamente 2000 m³/s.

Además considerando un riesgo admisible de 10%, una vida útil del puente de 50 años, y un período de retorno de 500 años, el caudal sería de 798.66 m³/s y también de acuerdo al análisis de la aplicación del programa HEC – HMS v.3.50 para Windows, que para el caso de la presente tesis se consideró como periodo de retorno de 50 años y 100 años, corresponde un caudal de 1726.20 m³/s y 2044.90 m³/s.

Luego el caudal de diseño considerado que asumimos es de 2044.90 m³/s, para un período de retorno de 100 años basándonos en el modelo de simulación que emplea el programa HEC –HMS v.3.50, dicho programa emplea el proceso lluvia – escorrentía, que considera el aporte e influencia de las 16 subcuencas en todo el trayecto del río Chancay hasta la zona de interés (Puente Reque), que a diferencia de los métodos estadísticos que solo consideran los datos hidrométricos de la Estación Racarumi y además por la gran importancia del puente Pucalá.

4.1.2 Estudio hidráulico

Tras la obtención del cálculo de caudales, para los periodos de retorno analizados, se ha procedido a elaborar el modelo hidráulico de simulación del flujo. El resultado de la aplicación de los caudales de cálculo al modelo hidráulico ha sido la determinación de los niveles alcanzados por el flujo y las velocidades del Río Chancay en la zona del Puente Pucalá, la longitud de análisis es de 1000m., con un ancho variable de hasta 350.00 m.

La metodología que se ha seguido consiste en la construcción de modelos hidráulicos unidimensionales, en régimen permanente de los cauces. Estos modelos han de recoger adecuadamente las características de su funcionamiento hidráulico adaptadas a la hipótesis de cálculo (unidimensionalmente y en régimen permanente). La modelización se ha realizado utilizando el programa HEC – RAS v.4.00 del U.S. Army Corps of Engineers.

Sobre el modelo del cauce actual del Río Chancay en el Puente Pucalá, se han determinado los niveles alcanzados por la corriente de agua para periodos de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, y 1000 años.

4.1.2.1 Pendiente del cauce principal

Se define como el desnivel entre los extremos de la corriente dividido entre su longitud medida en la planta. Taylor y Schwarz proponen calcular la pendiente media como la de un canal de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido que la corriente en cuestión, mediante la siguiente relación:

$$S = \left[\frac{m}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Ecuación 14: Pendiente según el criterio de Taylor y Schwarz

Donde: **m**: número de tramos

Si: pendiente del tramo *i* (para *i* = 1, 2, 3...), luego:

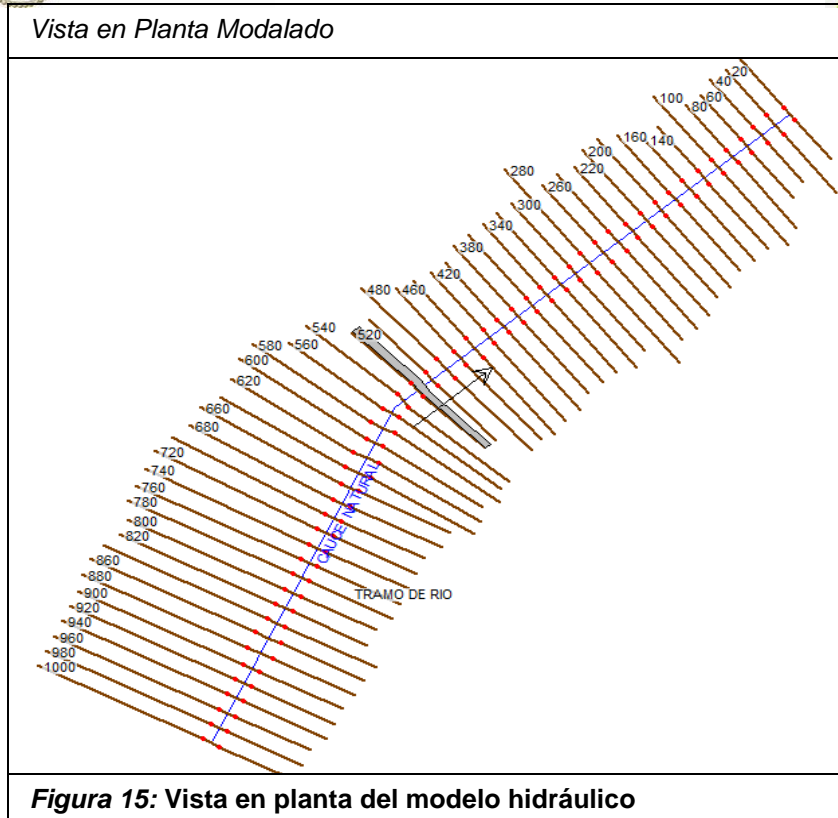
$$S = \frac{1}{\sqrt{0.0034} + \sqrt{0.0062} + \sqrt{0.0051} + \sqrt{0.0035} + \sqrt{0.0115} + \sqrt{0.0146} + \sqrt{0.0262} + \sqrt{0.0075} + \sqrt{0.0022} + \sqrt{0.0921} + \sqrt{0.0213} + \sqrt{0.0069} + \sqrt{0.0047} + \sqrt{0.0172} + \sqrt{0.0783} + \sqrt{0.0156} + \sqrt{0.0542} + \sqrt{0.0215}}$$

Según esta metodología la pendiente promedio del cauce principal se ha estimado en: **S = 0.00104 m/m.**

4.1.2.2 Cálculos hidráulicos

Con los caudales obtenidos por simulación hidrológica mostrado en el correspondiente al capítulo del Estudio Hidrológico de la presente tesis, para períodos de recurrencia de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años, se aplicó el modelo hidráulico de simulación del flujo con el programa HEC – RAS v.4.00.

El HEC – RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System, traducido al español Centro de Ingeniería Hidrológica – Sistema de Análisis de Ríos), es una aplicación que permite la modelación hidráulica en régimen permanente y no permanente de cauces abiertos, ríos y canales artificiales, desarrollada por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los E.E.U.U. (U.S. Army Corps of Engineers).



Fuente: Elaboración propia

Así mismo se ha desarrollado otras aplicaciones relacionadas con el HEC-RAS, tales como el HEC – HMS (Hydrologic Modeling System) que también ha servido de referencia para el Estudio Hidrológico de la presente tesis. La ejecución del cálculo hidráulico por el programa HEC – RAS, comprendió los siguientes pasos:

a) Modelo de la topografía de la zona del puente y de sus características hidráulicas (secciones transversales, alineamientos, rugosidad del cauce, asignación de caudales de diseño).

b) Corrida del programa e impresión de los resultados después del análisis respectivo, como resultado de la modelación hidráulica se ha obtenido los niveles alcanzados por las láminas de agua para los diferentes períodos de retorno y los parámetros hidráulicos en la secciones del Río Chancay en la zona del Puente

Reque, en una longitud de análisis de 1500.00 m, con un ancho de hasta 350 m, así mismo se han representado los tramos críticos (sección de interés) del río propensos a desbordamientos y socavación del cauce.

Con los cálculos hidráulicos realizados, se presentan a continuación las características hidráulicas en la sección de interés (Eje del Puente). Así mismo se presenta un cuadro comparativo (Tabla N°7 y Tabla N°8) de los resultados obtenidos en la presente tesis y los estudios realizados por la empresa SIMA CHIMBOTE S.A.

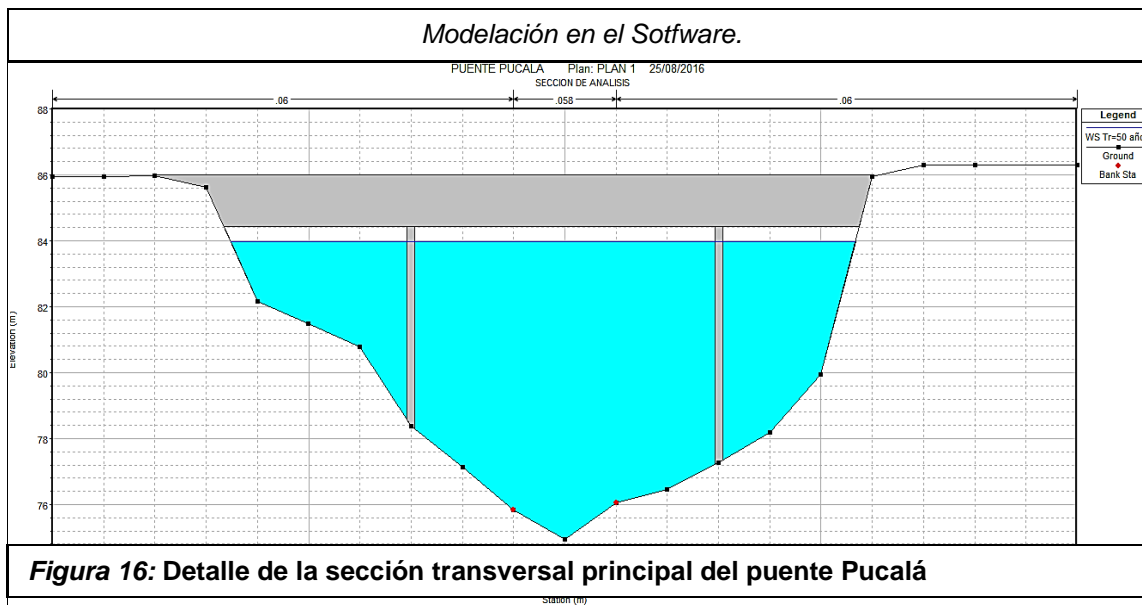
Las diferencias mostradas nos conducen a la evaluación de la capacidad y comportamiento hidráulico del puente desde el punto de vista de niveles, tirantes y velocidades alcanzadas, y sus efectos desde el punto de vista de la socavación y las consecuentes inundaciones que se podrían generar por máximas avenidas.

Tabla 9		
RESULTADOS HIDRAULICOS EN EL EJE DEL PUENTE		
CARACTERISTICAS HIDRAULICAS	TESIS ELABORADA POR ZVCN - USS	
	PERIODOS DE RETORNO (Tr)	
	50	100
Cota del Nivel del Agua (m)	83.95	84.57
Pendiente de Fondo (m/m)	0.00215	0.00215
Caudal Total (m ³ /s)	1726.20	2044.90
Velocidad Media (m/s)	2.16	2.86
Tirante Máximo (m)	9.01	9.63
Área Hidráulica (m ²)	660.57	714.07
Coeficiente de Rugosidad (márgenes)	0.060	0.060
Coeficiente de Rugosidad (cauce del río)	0.058	0.058

Fuente: SIMA S.A. – Elaboración propia.

TABLA 10			
Resultados obtenidos de la presente tesis para los períodos de retorno de 50 y 100 años			
RESULTADOS HIDRAULICOS EN EL EJE DEL PUENTE PUCALA			
CARACTERISTICAS HIDRAULICAS	ESTUDIO DE HIDROLOGIA E HIDRAULICA DE LA EMPRESA SIMA CHIMBOTE S.A.	TESIS ELABORADA POR	
		AC - AJ - EPIC - USS	
		PERIODO DE RETORNO DE 50 AÑOS	PERIODO DE RETORNO DE 100 AÑOS
Cota del Nivel del Agua (m)	84.21	83.95	85.84
Pendiente de Fondo (m/m)	0.0013	0.00215	0.00215
Caudal Total (m ³ /s)	1416.00	1726.20	2044.90
Velocidad Media (m/s)	3.43	2.16	2.86
Tirante Máximo (m)	8.13	9.01	9.63
Área Hidráulica	600.22	660.57	714.07
Coeficiente de Rugosidad (márgenes)	0.030	0.060	0.060
Coeficiente de Rugosidad (cauce)	0.030	0.058	0.058

Fuente: Estudio definitivo puente Pucalá - SIMA S.A.



4.1.3 Geología del área de fundación de la estructura

Las condiciones geológicas locales del área donde se ubica el puente Pucalá, no es más que el producto final de los procesos tectónicos y procesos de erosión e intemperismo a los que han estado sujeto las diferentes formaciones y/o depósitos que afloran en el área de ubicación del Puente. Por lo tanto su disposición, extensión lateral, vertical, características, propiedades mecánicas y físicas, se encuentran ligadas a su historial y evolución geológica por lo cual constituye de vital importancia comprender su evolución, dado que la superestructura forma parte de dicho medio y entonces debido a estas características geológicas de la zona involucra su estabilidad y permanencia para lo que fue diseñado. Según el estudio realizado por la el Ing. José Velásquez Díaz y por la empresa ZER GEOSYSTEM S.A. encargado por la empresa SIMA CHIMBOTE S.A. en el año 2009, siendo esta última empresa en mención la que construyó el puente.

PUENTE PUCALÁ			
GRANULOMETRÍA DE MATERIA DEL CAUCEL			
CALICATA	PROFUNDIDAD (m)	D90 (mm)	D50 (mm)
T-1		0.20	
C-1	0.00 a 1.20	0.42	
C-2	1.20 a 2.20	1.30	0.11
C-3			
C-4	0.60 a 0.85	42.00	5.50
C-5			
C-6	0.00 a 0.60	45.00	6.00
C-7			
C-8	1.60 a 2.20	30.00	
C-9	1.50 a 2.00	2.00	0.18
C-10	1.00 a 2.00	45.00	2.00
C-11	3.00 a 4.00	40.00	0.50

Tabla 11

Cuadro resumen de la distribución granulométrica

Fuente: Estudio definitivo puente Pucalá - SIMA S.A.

Los resultados obtenidos por dichos estudios sirvieron para elaborar los perfiles estratigráficos correspondientes según los niveles de profundidad alcanzados por los ensayos, luego dicho estudio concluye dos unidades de características bien diferenciadas y definidas, el primer nivel está conformado por suelos de origen reciente (arenas, limos, arcillas) de 15 m. de profundidad y un segundo nivel, ubicado por debajo de los 15 m. de profundidad, el cual constituye materiales pre consolidados definidos como roca arenisca.

Para validar estos resultados se realizaron también los ensayos respectivos en el Laboratorio de Ensayos y Materiales (LEM) de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán. En resumen se obtuvo en las calicatas un suelo del tipo SM y GP, mientras que otras variaron en un tipo de suelo ML y GP. Todos los resultados respecto al estudio de mecánica de suelos se presentan en el anexo correspondiente de la presente tesis.



CAPÍTULO V

PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

5.1 Modelo del mecanismo del colapso masivo asociado a la falla plana

El modelo del mecanismo del colapso masivo asociado a la falla plana es un procedimiento iterativo que integra tres módulos interconectados: un módulo hidrodinámico, uno sedimentológico y uno morfológico, los cuales se describen a continuación, a través de los cuales permitieron determinar la erosión en márgenes de ríos para este caso en los márgenes del puente Pucalá.

Tal como se explicó en la base teórica de la presente tesis de investigación ya en trabajos anteriores desarrollaron un modelo hidrodinámico para estudiar márgenes cohesivos y no cohesivos, presentaron también un submodelo longitudinal y otro transversal.

Según lo indicado por **(García & Menéndez, 2007)** en su investigación titulada: “Modelo integrado para calcular la evolución morfológica de canales, incluyendo erosión en márgenes cohesivos” explican que el submodelo transversal se basa en el modelo paramétrico para las corrientes secundarias en una curva, que provee la velocidad del flujo secundario en el fondo (ya que la misma es de relevancia para determinar el transporte de sedimentos de fondo transversal, el cual es el responsable de la erosión del sustrato no cohesivo). La transición entre este submodelo paramétrico y la condición de impenetrabilidad en el margen se realiza mediante la aplicación de una función moduladora o máscara.

Para el caso del modelo sedimentológico este se basa en la aplicación del modelo de **(Kovacs & Parker, 1994)** el cual estudiaron el transporte de material no cohesivo en márgenes de ríos aluviales, este a su vez se trata en cuestión de un modelo asociado al movimiento, en contraposición a los clásicos tratamientos con fórmulas empíricas. Su implementación para canales, incluyendo corrientes transversales debido a efectos de curvatura, ha sido presentada en otros trabajos los cuales han nutrido el buen desempeño del análisis del colapso en taludes, elementos muy indispensables para el desarrollo de la presente investigación, indican también que la metodología de investigación desarrollada representa un modelo morfológico que consta de tres componentes:

a) La primera componente tiene en cuenta el desbalance en el transporte lateral del material del sustrato no cohesivo.

b) La segunda componente del módulo morfológico considera el mecanismo de deslizamiento del material del sustrato no cohesivo cuando la pendiente lateral del lecho supera al ángulo de reposo. Este mecanismo es el que eventualmente produce la erosión de las partes no cohesivas de las márgenes. Para estas condiciones con la primera componente del módulo morfológico, se verifica la pendiente lateral entre nodos sucesivos de la sección transversal, comenzando desde el centro o intersección de la sección transversal y siguiendo en dirección hacia cada una de las márgenes bien de la derecha o de la izquierda.

c) Si la pendiente es menor que la crítica (dada por el ángulo de reposo del material del lecho), no se toma ninguna acción para ese segmento particular.

d) Por el contrario, si se encuentra alguna pendiente mayor a la crítica, la altura del nodo más alto de ese segmento particular de la sección transversal se baja hasta que la pendiente sea crítica. Esto determina una pérdida del volumen del suelo, que debe ser distribuido pendiente abajo. Esta distribución se realiza levantando la altura del nodo más bajo del segmento subsiguiente en dirección al centro de la sección transversal, a fin de acomodar el volumen de suelo deslizado.

e) Si el deslizamiento de suelo ocurre en el segmento adyacente a una margen (lo que implicaría que la altura del nodo extremo de la margen debería ser bajada) se agrega un nuevo nodo al dominio del cálculo (hacia el exterior del canal; renumerándose los nodos si esto ocurriese en la margen izquierda), nivelado con la altura original del nodo extremo de la margen (que es la altura de la superficie del agua), para representar la nueva localización de la margen (es decir, se convierte en el nodo extremo de la margen para el próximo paso de cálculo). En el caso de que la superficie de agua no esté a la misma altura que la margen, al volumen deslizado se le agrega el volumen de suelo de la margen por sobre el nivel de agua (en ese caso solo se necesita saber la altura de la margen), con la porción seca de la margen tomando una pendiente igual a la crítica.

f) Debido a que el deslizamiento del volumen de suelo en dirección al centro de la sección transversal puede conducir a que se produzcan pendientes transversales del lecho mayores a la crítica, el algoritmo propuesto se repite iterativamente para cada paso de cálculo hasta que no se encuentren pendientes mayores a la crítica. En caso de existir un estrato cohesivo por encima del estrato no cohesivo, el retraimiento de éste último puede producir una eventual falla por voladizo. Se supone además una falla de tipo plana, lo que es común para márgenes

desestabilizadas por la degradación severa del fondo del lecho con el plano de falla pasando a través del punto superior del estrato no cohesivo de la margen. Se consideran todas las posibilidades con respecto a las elevaciones relativas de la superficie del agua, del nivel freático y de la profundidad de la grieta de la tensión, pero adaptadas a este tipo de modelo de falla. Luego a través del uso del programa realiza una búsqueda, barriendo toda la gama de posibles ángulos de falla. Una vez que el factor de seguridad es menor a uno, el ángulo que corresponde a la cohesión mínima se selecciona como el ángulo de falla.

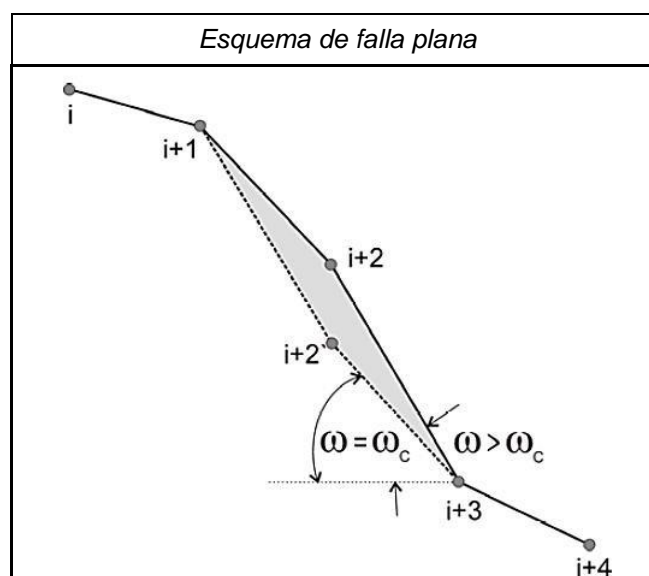


Figura 17: Falla plana en una margen de un río.

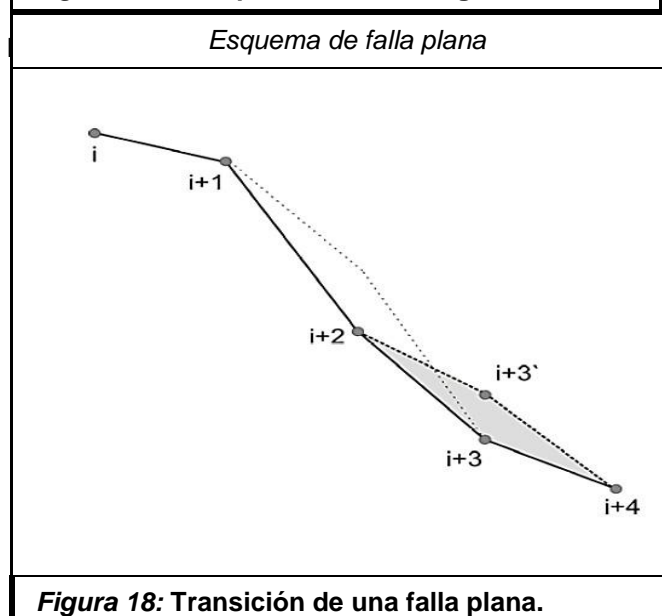
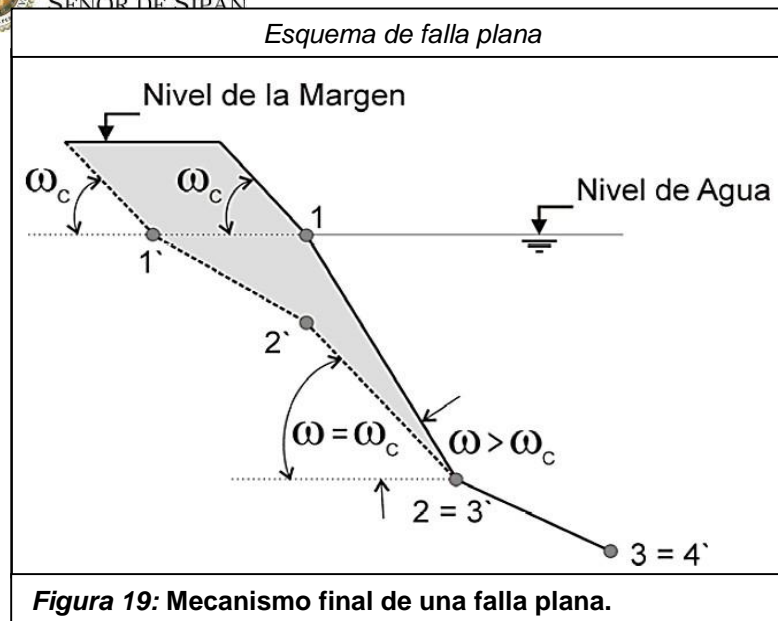


Figura 18: Transición de una falla plana.

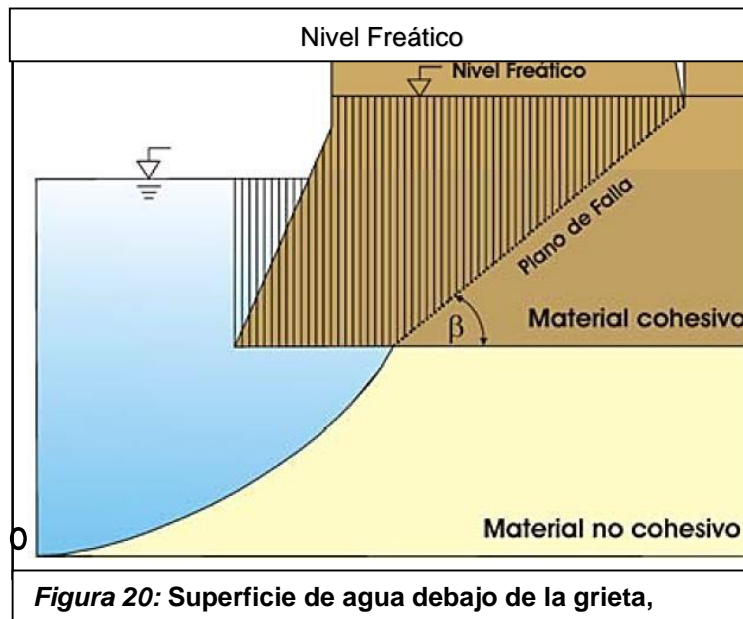


Fuente: (García & Menéndez, 2007)

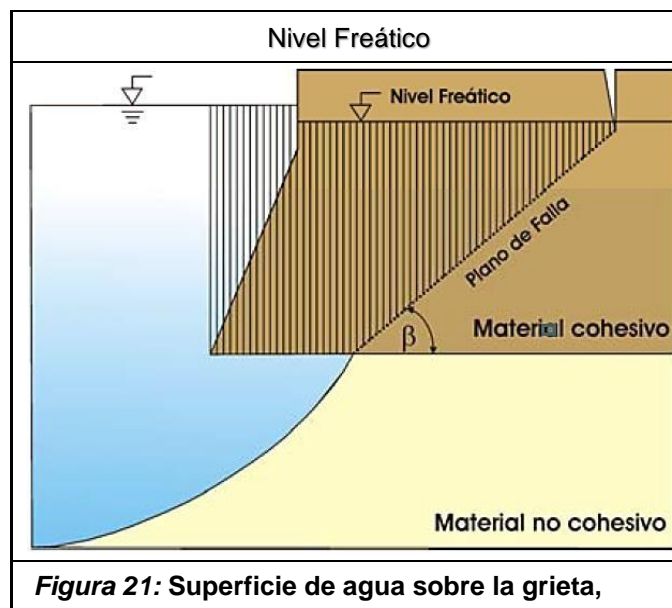
El análisis y tratamiento del modelo de mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana que realiza el programa para facilitar el procedimiento de la teoría mostrada anteriormente es el denominado SOCAVA desarrollado por el Instituto Nacional del Agua, el Laboratorio de Hidráulica y el Laboratorio de Modelación Matemática de la Universidad de Buenos Aires de Argentina el cual permite obtener los principales parámetros de los estratos cohesivos y no cohesivos y es relativamente simple, por ejemplo se utilizan cinco nodos por margen para definirlo, según lo mostrado en los gráficos anteriores, además cuando se produce una falla, el nodo inferior se mueve para coincidir con el nodo extremo del estrato no cohesivo, mientras que los nodos superiores se sitúan de forma de definir el ángulo de falla.

La fracción gruesa del material fallado se considera que cae en el pie de la margen, y se la distribuye lateralmente según su ángulo de reposo, mientras que la fracción fina se supone incorporada a la carga de lavado, y por lo tanto no se la tiene en cuenta. Al material fallado se lo trata en lo sucesivo como material no cohesivo de

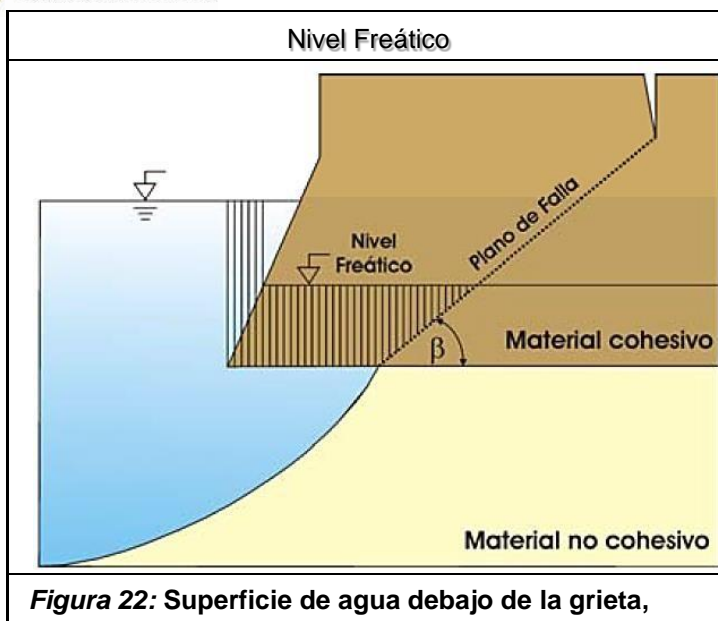
un diámetro diferente al asociado al sustrato original. A continuación se muestran en detalle, las fallas planas debido al proceso del mecanismo del colapso masivo.



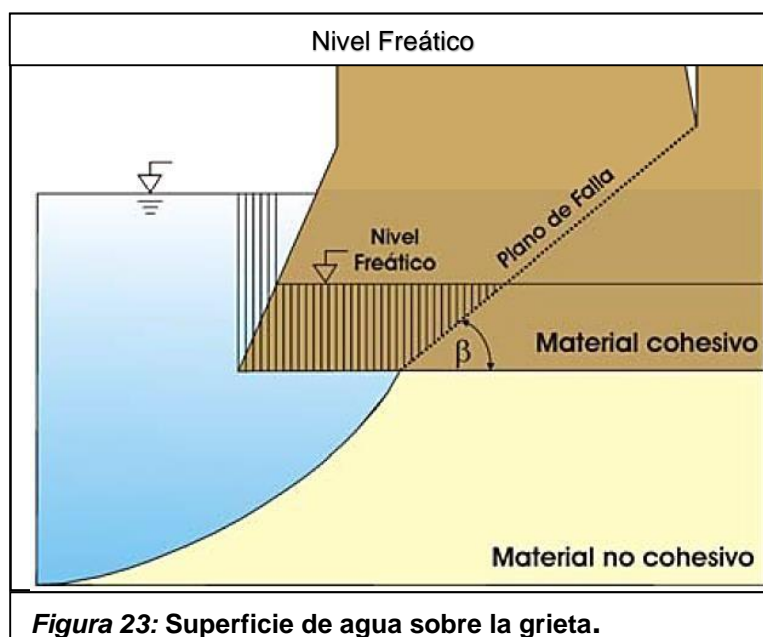
Fuente: (García & Menéndez, 2007)



Fuente: (García & Menéndez, 2007)



Fuente: (García & Menéndez, 2007)



Fuente: (García & Menéndez, 2007)

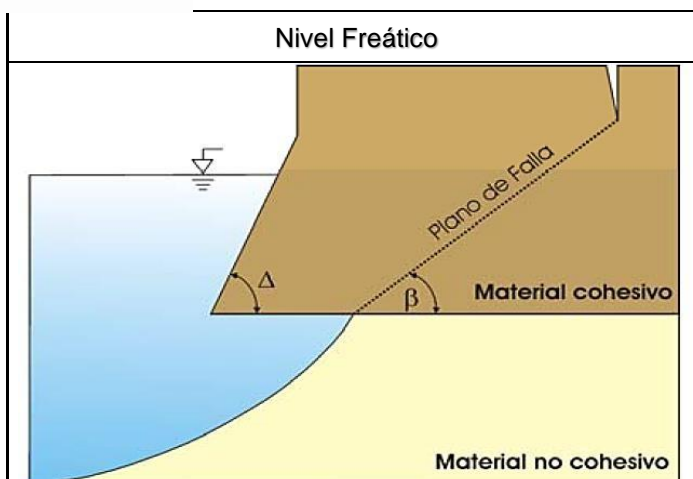


Figura 24: Superficie de agua sobre la grieta.

Fuente: (García & Menéndez, 2007).

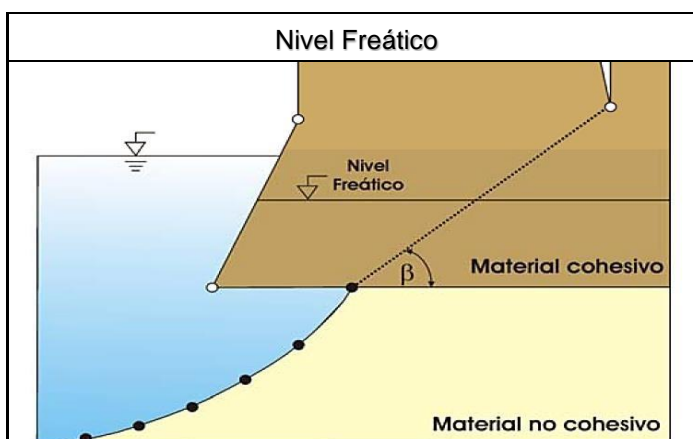


Figura 25: Tratamiento computacional

Fuente: (García & Menéndez, 2007).

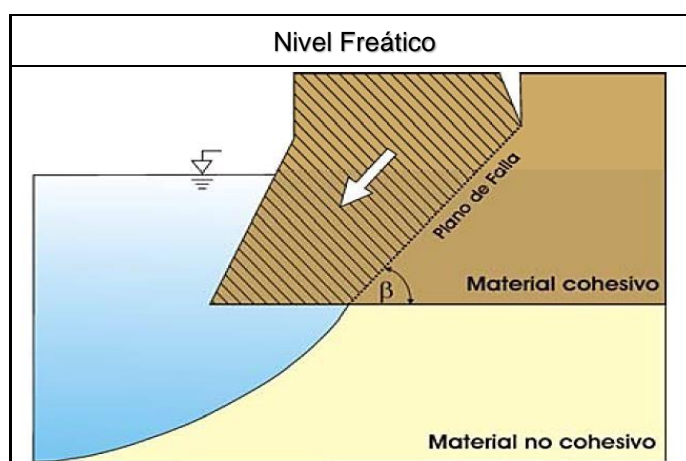
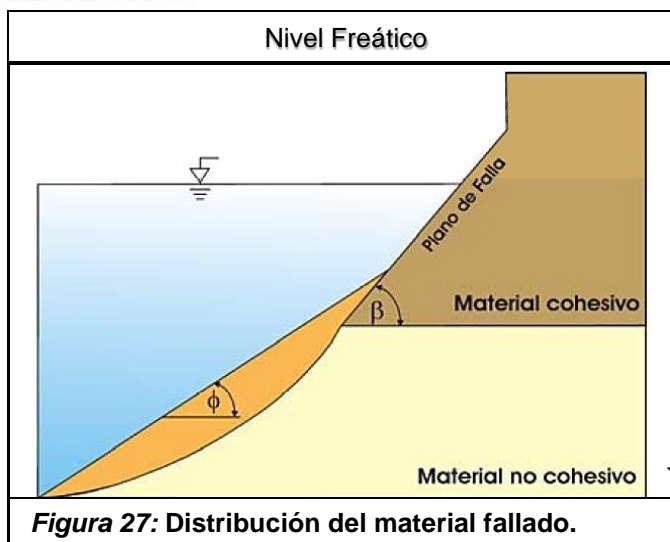


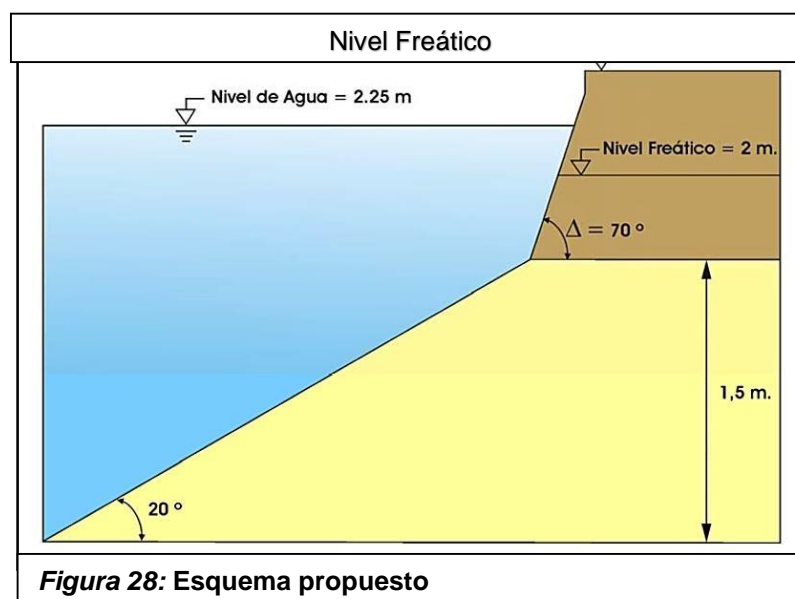
Figura 26: Distribución del material fallado.

Fuente: (García & Menéndez, 2007).



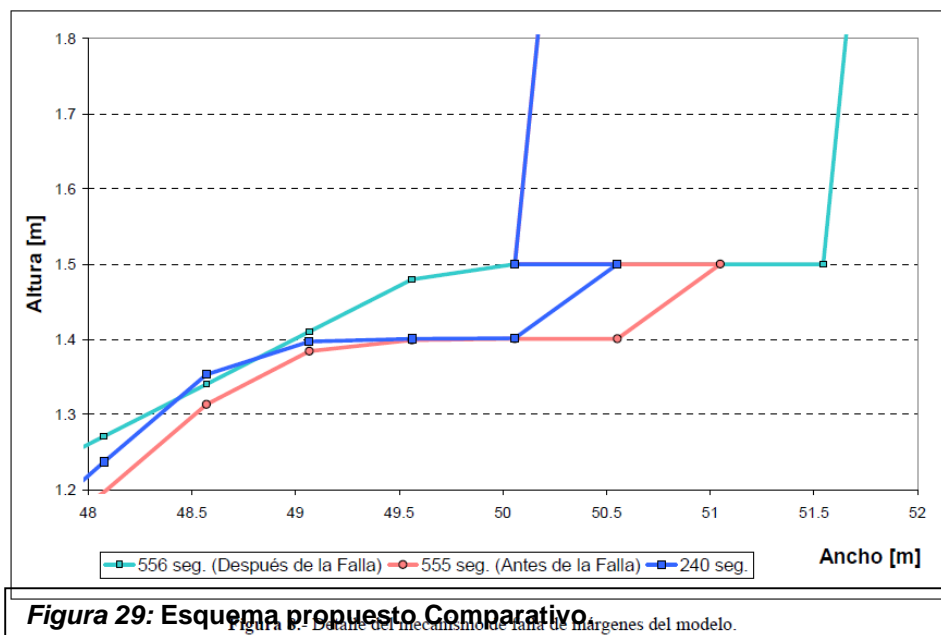
Fuente: (García & Menéndez, 2007).

(Laciana & Menéndez, 2002). En segundo lugar, estudiaron un canal curvo de márgenes fijas, validándose el tratamiento para los efectos erosivos de la corriente secundaria, para luego en una tercera prueba de la validación que consistió en comparar el ángulo de falla del estrato cohesivo según lo predicho por el actual modelo, para el caso particular en que el plano de falla pase por el pie o fondo del estrato (la única situación comparable entre los dos modelos).



Fuente: (García & Menéndez, 2007).

Esquema de Mecanismo de Falla



Fuente: (García & Menéndez, 2007).

5.2 Aplicación del mecanismo del colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión del puente Pucalá

Para determinar la erosión del cauce y al menos las diferentes condiciones de falla plana se consideró algunas características iniciales propias de la zona en estudio el cual permitió estimar la falla a partir de una altura del estrato de casi 9 metros de altura, con una pendiente inicial prácticamente vertical de la margen (89°), a fin de garantizar condiciones inestables y la disminución parcial del factor de seguridad por estabilidad del propio talud, y una profundidad de la grieta de tensión de 2 metros en promedio. Los parámetros del suelo fueron en promedio los siguientes: cohesión de 14.9 kN/m^2 , ángulo de fricción interna del suelo = 25° y peso específico = 20.9 kN/m^3 . Se tomaron en cuenta dos profundidades del nivel freático y diversas profundidades de la superficie del agua considerando siempre en todos los casos el más desfavorable.



Fuente: Programa SOCAVA

Parámetro	Valor	Unidad
ELEVACION DE LA MARGEN	5.2	METROS
ELEVACION DE BASE DE ESTRATO COHESIVO	3.5	METROS
INCLINACION DEL TALUD	80	GRADOS
PROFUNDIDAD DE LA GRIETA PRIMARIA	4.8	METROS
PROFUNDIDAD GRIETA	4.8	METROS
NIVEL FREATICO	3.5	METROS
NIVEL DE AGUA	3.5	METROS
COHESION	14.9	KN/M ²
PESO ESPECIFICO DEL AGUA	10	KN/M ³
PESO ESPECIFICO DEL SUELO	20.9	KN/M ³
ANGULO DE FRICCION	29	GRADOS

Fuente: Programa SOCAVA

5.2.1 Discusión de los resultados obtenidos

a. Respecto a los resultados obtenidos se observa que los ángulos de falla proporcionados por el programa con los medidos para cada sección transversal son muy similares, por lo que la actual formulación se considera como validada.

b. En el análisis también se observó que el factor de seguridad disminuye con el aumento del ángulo inicial de las márgenes del río en la inmediaciones del puente Pucalá, con el aumento de la erosión del lecho móvil, con el aumento de la erosión del fondo del cauce de la margen tanto izquierda como derecha, con la disminución de la cohesión, con el incremento de la profundidad de la grieta de tracción en condiciones de máximos esfuerzos y con la disminución del ángulo de fricción interna, por lo tanto se puede decir que influye mucho las características del suelos en el mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana, sobre todo en condición de suelos no cohesivos o suelos granulares.

c. Por otra parte, cuando se verifican en forma conjunta los procesos de erosión de lecho del lecho, erosión de pie del margen tanto de la derecha como de la izquierda además de la profundidad de grieta de tracción, para esos casos el valor del factor de seguridad disminuye drásticamente llegando inclusive a valores mucho menores de 1.00, en este caso, la grieta de tracción conduce a una disminución del incremento de ancho y una disminución del volumen total colapsado, siendo éste término no muy aplicativo debido a que en este caso el análisis es para una falla plana no es un análisis tridimensional.

d. Finalmente, a igualdad de condiciones de erosión, cohesión, peso específico, etc., se observa que el factor de seguridad “Fs” disminuye a medida que aumenta el contenido de agua en el suelo de la margen, esto debido a que el suelo pierde su capacidad de soporte y por ende los esfuerzos disminuyen considerablemente.

e. Al realizar el estudio hidrológico e hidráulico se puede rescatar que directamente influyen dos indicadores bien definidos: el caudal para cierto período de retorno y así mismo los niveles máximos alcanzados. El resumen de resultados se muestra a continuación:

Tabla 12		
RESULTADOS HIDRAULICOS EN EL EJE DEL PUENTE		
CARACTERISTICAS HIDRAULICAS	TESIS ELABORADA POR ZVCN - USS	
	PERIODOS DE RETORNO (Tr) EN AÑOS	
	50	100
Cota del Nivel del Agua (m)	83.95	84.57
Pendiente de Fondo (m/m)	0.00215	0.00215
Caudal Total (m ³ /s)	1726.20	2044.90
Velocidad Media (m/s)	2.16	2.86
Tirante Máximo (m)	9.01	9.63
Área Hidráulica (m ²)	660.57	714.07
Coeficiente de Rugosidad (márgenes)	0.060	0.060
Coeficiente de Rugosidad (cauce del río)	0.058	0.058

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Como objetivo principal se llegó a analizar el comportamiento del mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para determinar la erosión del cauce en el puente Pucalá, describiendo para ello las características del puente y la zona estudio, tal y como se detalla en la presente investigación.
2. Se seleccionó y recolectó la información disponible respecto a las características físicas y mecánicas del suelo, hidrología de la cuenca y comportamiento hidráulico, empleando para ello un estudio de mecánica de suelos predominan además un tipo arenoso con presencia de limos y en otros con arcillas de mediana plasticidad, respecto al estudio hidrológico se consideró un período de retorno de 50 años obteniéndose un caudal de $1726.20 \text{ m}^3/\text{s}$ y para el estudio hidráulico llegó a un nivel máximo de 9.63 metros.
3. Se utilizó un modelo basado en el mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana para el adecuado análisis hidráulico del comportamiento del río en la zona del Puente Pucalá, considerándose para ello la teoría del mecanismo del colapso masivo aplicativo en el plano, llegándose a estimar que las márgenes del río en las inmediaciones del puente Pucalá fallarían para un período de retorno de 50 años, sin embargo para un nivel menor de hasta 5 metros los taludes aún se mantendrían estables y el factor de seguridad sería mayor a 2.
4. Al comparar los resultados del modelo de mecanismo de colapso masivo asociado a la falla plana y del software HEC – RAS, se puede decir que ambos programas nos ofrecen alternativas de cálculo que permiten determinar la erosión

en márgenes de ríos, sin embargo se requiere conocer siempre las características topográficas y el tipo de suelo.

5. Se determinó los niveles de erosión en base al modelo del mecanismo de colapso masivo y HEC – RAS, los cuales permitieron determinar los perfiles de socavación para los diferentes períodos de retorno estableciéndose además los diferentes perfiles de flujo y sus parámetros hidráulicos los cuales se muestran en los planos respectivos de la presente tesis.

6. Se recomienda considerar en futuras investigaciones el análisis de falla en taludes por efectos sísmicos o de desplazamientos monotónicos o cíclicos donde se considere la falla plana y el nivel freático en diferentes niveles, puesto que el programa no permite caracterizar el comportamiento mismo del material en sus diferentes estados lineal y no lineal.

7. La erosión en sus condiciones iniciales es impredecible estimarla con exactitud, debido a que depende del caudal, el tipo de transporte de sedimentos que pueden ser de arrastre, suspensión y saltación como caudal sólido, además se recomienda estudiar otros casos que impliquen el comportamiento del material saturado hasta antes de que falle y colapse el talud de las márgenes de un río.

REFERENCIAS

- Alvarado, A., & Ettmer, B. (2007). Morfología fluvial y erosión en curvas abruptas del río Ucayali, Perú. *RIOS 2007*, 1-23.
- Aranzamendi Lino (2013). Instructivo teórico-práctico del diseño y redacción de la tesis. Peru: Editora Grijley.
- Arriola, G., & Bejarano, L. (2013). Estudio de los métodos de análisis basados en la superposición de componentes de socavación para pilares complejos aplicados al puente Reque. *TZHOECOEN*, 177-198.
- Ayala, I. (2009). *Programa Lluvia Escorrentía para simulación de defensas ribereñas con OBJECTARX C++*. Ayacucho, Perú: Publicaciones de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga.
- Cuba, D. (Setiembre de 2013). Estudio de las causas y soluciones estructurales del colapso total o parcial de los puentes vehiculares de Colombia desde 1986 al 2011 y la evaluación de las consecuencias del derrumbamiento de uno ellos. *Memorias del VI Encuentro de Ingenieros Suelos y Estructuras*, 1-20.
- García, M., & Basile, P. (Noviembre de 2007). Modelación hidrodinámica de sistemas cauce - planicie de inundación en grandes ríos aluviales de llanura. *Memorias del III Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos 2007*, 3-15. Obtenido de http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index_archivos/A/3.pdf
- García, R., & Menéndez, A. (2007). Modelo integrado para calcular la evolución morfológica de canales, incluyendo erosión en márgenes cohesivas. *Memorias del III Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos 2007*, 11. Obtenido de http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2007/index_archivos/A/4.pdf
- Guitelman, A., & Valle, A. d. (2008). Monitoreo de la erosión y sedimentación en puentes. 5-6.
- Pizarro Roberto, M. C. (2009). *Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la Región de Coquimbo, Chile* (Vols. PH-VII). Montevideo, Uruguay: Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencias para

América Latina y El Caribe de la ONU, UNESCO y la Universidad de Talca. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002163/216337s.pdf>

Reyes Carrasco, L. (2012). Propuesta de encauzamiento del Río Reque. *Ponencias del XXI Congreso Nacional de Ingeniería Civil*, 66 - 70.

Rocha, A. (2007). El Meganiño 1982-83, “La madre de todos los Niños”. *Publicaciones del Instituto de la Construcción y Gerencia - II Congreso Internacional HIDRO 2007*, 1-41.

Rocha, A. (2010). *Erosión en pilares y estribos en puentes*. Lima, Perú: Capítulo 10 - Introducción a la hidráulica de las obras viales.

Seaurz, A. (2006). Hidráulica de Puentes, extracto de tesis: “Dimensionamiento hidráulico optimizado de puentes con terraplenes”. *Hidráulica de puentes*, 1-41.

Stalin, G. (2014). *Estudio comparativo de los métodos empíricos, estadísticos y de un modelo de simulación con el programa HEC - HMS para determinar los caudales máximos en la Cuenca del Río Chancay para el diseño de obras hidráulicas en el año 2014*. Chiclayo, Lambayeque, Perú: Publicaciones de la Universidad César Vallejo.

Yeily, B., & Concepción, L. (2014). *Modelamiento hidrológico e hidráulico aplicado al cálculo de socavación en puentes Potrero (km 165 + 527.00) y Maygasbamba (km 197 + 688.15), ubicados en carretera Chota – Bambamarca – Hualgayoc*. Universidad Privada Antenor Orrego. Trujillo: Repositorio digital de tesis de la Universidad Privada Antenor Orrego.
