



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN ANTE EL
FLUJO DE LOS LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI PARA
LA CUENCA NORTE**

**AUTORES: BONITO PALACIOS MARCELO FERNANDO
NARANJO CADENA MARÍA JOSÉ**

DIRECTOR: ING. SANDOVAL E, WASHINGTON, Ph.D

SANGOLQUI

2016



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el Trabajo de Titulación “**DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN ANTE EL FLUJO DE LOS LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI PARA LA CUENCA NORTE**” ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores, **BONITO PALACIOS MARCELO FERNANDO** y **NARANJO CADENA MARÍA JOSÉ** para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, 28 de Julio del 2016



Ing. Washington Sandoval, Ph.D

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **BONITO PALACIOS MARCELO FERNANDO** y **NARANJO CADENA MARÍA JOSÉ**, declaramos que este Trabajo de Titulación “**DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN ANTE EL FLUJO DE LOS LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI PARA LA CUENCA NORTE**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

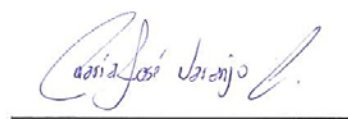
Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 28 de Julio del 2016



MARCELO FERNANDO BONITO

C.I. 1400509723



MARÍA JOSÉ NARANJO

C.I. 1721930491



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

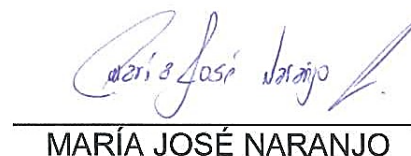
Nosotros **BONITO PALACIOS MARCELO FERNANDO** y **NARANJO CADENA MARÍA JOSÉ**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la Biblioteca Virtual de la Institución el presente Trabajo de Titulación “**DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN ANTE EL FLUJO DE LOS LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI PARA LA CUENCA NORTE**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 28 de Julio del 2016



MARCELO FERNANDO BONITO

C.I. 1400509723



MARÍA JOSÉ NARANJO

C.I. 1721930491

DEDICATORIA

Dedico esta gran meta a la bendición más grande que Dios me ha dado, a mis amados Padres, César Naranjo y Susana Cadena, que con su amor infinito, paciencia, sabiduría y apoyo incondicional me han guiado en cada instante de mi vida.

A mi amada sobrina Doménica que llego a mi vida en el momento más indicado a llenarme de felicidad y por quien hago mi mayor esfuerzo para darle el mayor ejemplo.

A mi querida familia por creer en mí y alentarme para seguir adelante.

María José Naranjo Cadena

A mis padres Marco Bonito y Esthela Palacios, quienes con su amor, esfuerzo y sabiduría me guiaron en el camino de la vida, apoyándome en todo momento y enseñándome a ser una persona de bien.

A mis hermanos: Sayonara, Mauricio, María, Mayra y Marco Enrique, quienes me han cuidado toda la vida, siendo un apoyo incondicional en el pasar del tiempo.

A Dios y la Purísima de Macas, sin su bendición no hubiera sido posible.

Marcelo Fernando Bonito Palacios

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por guiar mi camino y darme a los mejores padres del mundo.

A mis Padres César Naranjo y Susana Cadena que son el pilar fundamental de mi vida; mi padre que me ha enseñado a ser perseverante, luchadora y de carácter muy firme, mi Madre una gran mujer que con su cariño, calidez y sus palabras de aliento me ha impulsado siempre a seguir adelante.

A mis hermanos, especialmente a mi hermano Paúl por ser un gran amigo y por apoyarme en los momentos más difíciles y siempre brindarme una palabra de aliento.

A mis sobrinos Gabriel, Maryorie, Daniel y Andrés que con su simpatía y bromas siempre han estado apoyándome incondicionalmente.

A Carlos que ha estado a mi lado en todo momento desinteresadamente, gracias por la paciencia, confianza y sobre todo por el cariño y apoyo en los arduos momentos.

Finalmente a cada uno de mis profesores por cada conocimiento impartido y de manera especial al Dr. Washington Sandoval por guiarme en la elaboración del presente trabajo de titulación.

María José Naranjo Cadena

AGRADECIMIENTOS

A Dios por mantenerme constante, por no permitirme desistir y lograr otro objetivo de mi vida.

A mi familia. Mis padres, por su amor incondicional y sacrificio para que pueda lograr mis objetivos; Mis hermanos, por ser amigos, por cuidar de mí y anhelar que cumpla todos mis sueños; Mis sobrinos, por ser los pequeños de la casa, por darme su cariño y mostrar que puedo llegar a ser un ejemplo para ustedes, GRACIAS.

A mis amigos del colegio, universidad, fútbol y de la vida, por brindarme su amistad, por permitir llegar a ser parte de ustedes y apoyarme en todo momento.

A mis maestros, por brindarnos su amistad, conocimientos y valores, permitiendo la superación personal, en especial al Dr. Washington Sandoval, quien con su completo apoyo y sabiduría permitió la elaboración de este proyecto.

Marcelo Fernando Bonito Palacios

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| CERTIFICACIÓN | i |
| AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| AUTORIZACIÓN | iii |
| DEDICATORIA | iv |
| AGRADECIMIENTOS | v |
| AGRADECIMIENTOS | vi |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | vii |
| ÍNDICE DE TABLAS | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xiii |
| RESUMEN | xvi |
| ABSTRACT | xvii |
| CAPITULO 1: ASPECTOS GENERALES | 1 |
| 1.1 Antecedentes..... | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1 Objetivo general..... | 3 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 3 |
| 1.3 Justificación del proyecto..... | 4 |
| CAPITULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS | 5 |
| 2.1 Descripción de la localización geográfica del volcán Cotopaxi | 5 |
| 2.2 Historia geológica del volcán Cotopaxi | 6 |
| 2.2.1 Período pre - histórico | 6 |
| 2.2.2 Período histórico..... | 10 |
| 2.3 Riesgo volcánico..... | 13 |
| 2.4 Fenómenos eruptivos del volcán Cotopaxi | 15 |
| 2.4.1 Avalanchas de escombros..... | 16 |
| 2.4.2 Flujos de lodo y escombros (lahares) | 18 |
| 2.4.3 Caída de ceniza y piroclastos..... | 22 |
| 2.4.4 Flujos piroclásticos | 24 |
| 2.4.5 Domos de lava..... | 25 |
| 2.4.6 Flujos de lava..... | 26 |

| | | |
|---|--|------------|
| 2.4.7 | Gases volcánicos..... | 27 |
| 2.4.8 | Sismos volcánicos | 28 |
| CAPITULO 3: MARCO TEÓRICO..... | | 29 |
| 3.1 | Definición de presa | 29 |
| 3.2 | Presas según los materiales empleados | 29 |
| 3.2.1 | Presas de materiales sueltos..... | 30 |
| 3.2.2 | Presas de gaviones | 34 |
| 3.2.3 | Presas de hormigón..... | 35 |
| 3.3 | Otras obras de contención de lahares | 37 |
| 3.3.1 | Sistemas flexibles de membranas de acero | 37 |
| CAPITULO 4: TOPOGRAFÍA, HIDROLOGÍA Y SUELOS..... | | 42 |
| 4.1 | Descripción del estudio..... | 42 |
| 4.1.1 | Recorrido de los lahares en la cuenca norte..... | 42 |
| 4.2 | Condiciones climáticas | 43 |
| 4.3 | Topografía | 43 |
| 4.3.1 | Reconocimiento del terreno | 43 |
| 4.3.2 | Procesamiento de datos | 45 |
| 4.4 | Ubicación geográfica del proyecto..... | 45 |
| 4.5 | Bases de diseño | 46 |
| 4.5.1 | Área y volumen del glaciar del volcán Cotopaxi | 46 |
| 4.5.2 | Volumen de embalse | 50 |
| 4.5.3 | Volumen de presa..... | 56 |
| 4.5.4 | Altura del lahar..... | 59 |
| 4.6 | Estudio hidrológico e hidráulico | 66 |
| 4.6.1 | Parámetros morfométricos..... | 66 |
| 4.6.2 | Tiempo de concentración..... | 71 |
| 4.6.3 | Caudal de diseño para la alcantarilla..... | 73 |
| 4.7 | Suelos..... | 78 |
| 4.7.1 | Sísmica de refracción | 78 |
| 4.7.2 | Tipos de perfil de suelo..... | 88 |
| 4.7.3 | Propiedades mecánicas del suelo | 89 |
| CAPÍTULO 5: DISEÑO DE LAS PRESAS MIXTAS | | 100 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 5.1 | Presa mixta del río El Salto..... | 101 |
| 5.1.1 | Estabilidad de la presa..... | 101 |
| 5.1.2 | Diseño de la alcantarilla..... | 116 |
| 5.1.3 | Diseño del canal de rápida con tapa y columpio..... | 121 |
| 5.1.4 | Estructura de descarga..... | 124 |
| 5.2 | Presa mixta del río Pita..... | 125 |
| 5.2.1 | Estabilidad de la presa..... | 125 |
| 5.2.2 | Diseño de la alcantarilla..... | 137 |
| 5.2.3 | Diseño del canal de rápida con tapa y columpio..... | 139 |
| 5.2.4 | Estructura de descarga..... | 140 |
| 5.3 | Refuerzo mínimo para muros | 141 |
| 5.4 | Presupuesto aproximado..... | 147 |
| | CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 150 |
| 6.1 | Conclusiones | 150 |
| 6.2 | Recomendaciones | 151 |
| 6.3 | Referencias bibliográficas..... | 152 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Víctimas causadas por lahares | 21 |
| Tabla 2: Área total del casquete glaciar en diferentes períodos..... | 48 |
| Tabla 3: Área y volumen del casquete glaciar hasta Agosto del 2015 | 48 |
| Tabla 4: Área y volumen del casquete glaciar para la cuenca hidrográfica del río El Salto | 49 |
| Tabla 5: Área y volumen del casquete glaciar para la cuenca hidrográfica del río Pita | 50 |
| Tabla 6: Volumen de embalse de los seis puntos de estudio para los ríos El Salto y Pita..... | 52 |
| Tabla 7: Curva característica del embalse para el Río El Salto..... | 54 |
| Tabla 8: Curva característica del embalse el Río Pita..... | 55 |
| Tabla 9: Volumen de la presa para los seis puntos de estudio para los ríos El Salto y Pita..... | 56 |
| Tabla 10: Volumen de la presa para el río El Salto | 56 |
| Tabla 11: Volumen de la presa para el río Pita | 57 |
| Tabla 12: Caudal máximo en función de volumen de embalse | 60 |
| Tabla 13: Cálculo del radio hidráulico | 62 |
| Tabla 14: Cálculo del caudal | 62 |
| Tabla 15: Cálculo del radio hidráulico ajustado..... | 63 |
| Tabla 16: Cálculo del caudal ajustado..... | 63 |
| Tabla 17: Fuerza de impacto para la presa del río El Salto..... | 64 |
| Tabla 18: Cálculo del radio hidráulico | 64 |
| Tabla 19: Cálculo del caudal | 65 |
| Tabla 20: Cálculo del radio hidráulico ajustado..... | 65 |
| Tabla 21: Cálculo del caudal ajustado..... | 65 |
| Tabla 22: Fuerza de impacto para la presa del río Pita..... | 66 |
| Tabla 23: Rangos del coeficiente de compacidad | 67 |
| Tabla 24: Parámetros morfométricos para la cuenca hidrográfica superficial del río El Salto..... | 69 |
| Tabla 25: Parámetros morfométricos para la cuenca hidrográfica superficial del río Pita..... | 71 |
| Tabla 26: Tiempos de concentración | 72 |
| Tabla 27: Tiempos de concentración | 72 |
| Tabla 28: Caudales máximos de la estación de aforo H0158 | 73 |
| Tabla 29: Caudales máximos ordenados de la estación de aforo H0158 .. | 75 |
| Tabla 30: $C_s=2C_v$ | 76 |
| Tabla 31: Clasificación de los perfiles de suelo..... | 88 |
| Tabla 32: Contenido de humedad | 90 |
| Tabla 33: Densidad suelta..... | 91 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 34: Densidad varillada | 92 |
| Tabla 35: Peso específico y absorción del árido grueso | 93 |
| Tabla 36: Gravedad específica y absorción del árido fino | 94 |
| Tabla 37: Carga puntual | 95 |
| Tabla 38: Corte directo para carga de 50 MPa..... | 96 |
| Tabla 39: Corte directo para carga de 100 MPa..... | 96 |
| Tabla 40: Corte directo para carga de 150 MPa..... | 97 |
| Tabla 41: Momento estabilizador para el contrafuerte | 102 |
| Tabla 42: Momento estabilizador para la pantalla y las paredes de arriostamiento | 103 |
| Tabla 43: Momento estabilizador para el relleno de material suelto..... | 104 |
| Tabla 44: Momento estabilizador | 104 |
| Tabla 45: Momento volcador | 105 |
| Tabla 46: Momento centro base para el contrafuerte..... | 106 |
| Tabla 47: Momento centro base para la pantalla y las paredes de arriostamiento | 107 |
| Tabla 48: Momento centro base para el relleno de materiales sueltos | 107 |
| Tabla 49: Momento centro base..... | 108 |
| Tabla 50: Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada .. | 109 |
| Tabla 51: Fuerzas y momento de la presa para el río El Salto considerando lahar..... | 111 |
| Tabla 52: Esfuerzos presa llena | 111 |
| Tabla 53: Fuerzas y momento de la presa para el río El Salto sin lahar .. | 111 |
| Tabla 54: Esfuerzos presa llena | 111 |
| Tabla 55: Coeficientes para el factor de seguridad al deslizamiento..... | 112 |
| Tabla 56: Factor de importancia según el tipo de estructura..... | 114 |
| Tabla 57: Factor de seguridad para la presa de materiales sueltos del río El Salto..... | 116 |
| Tabla 58: Cálculo del tirante de agua en la entrada del canal..... | 117 |
| Tabla 59: Cálculo del tirante contraído..... | 118 |
| Tabla 60: Parámetros del pozo de agua | 119 |
| Tabla 61: Velocidades máximas permisibles en rápidas lisas..... | 122 |
| Tabla 62: Dimensiones de la estructura de descarga para el río El Salto | 124 |
| Tabla 63: Momento estabilizador para el contrafuerte | 126 |
| Tabla 64: Momento estabilizador para la pantalla y las paredes arriostamiento | 127 |
| Tabla 65: Momento estabilizador para el relleno de material suelto..... | 128 |
| Tabla 66: Momento estabilizador | 128 |
| Tabla 67: Momento volcador | 129 |
| Tabla 68: Momento centro base para el contrafuerte..... | 130 |
| Tabla 69: Momento centro base para la pantalla y las paredes de arriostamiento | 130 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 70: Momento centro base para el relleno de material suelto | 131 |
| Tabla 71: Momento centro base | 131 |
| Tabla 72: Fuerzas y momento de la presa para el río Pita considerando lahar | 133 |
| Tabla 73: Esfuerzos presa llena | 133 |
| Tabla 74: Fuerzas y momento de la presa para el río Pita sin lahar | 134 |
| Tabla 75: Esfuerzos presa llena | 134 |
| Tabla 76: Coeficientes para el factor de seguridad al deslizamiento..... | 135 |
| Tabla 77: Factor de seguridad para la presa de materiales sueltos del río Pita..... | 136 |
| Tabla 78: Cálculo del tirante de agua en la entrada del canal..... | 137 |
| Tabla 79: Cálculo del tirante contraído | 137 |
| Tabla 80: Parámetros del pozo de agua | 138 |
| Tabla 81: Dimensiones de la estructura de descarga para el río Pita | 140 |
| Tabla 82: Refuerzo mínimo horizontal de acuerdo a la distancia entre juntas | 141 |
| Tabla 83: Áreas de pantalla y contrafuertes para la presa del río El Salto..... | 145 |
| Tabla 84: Áreas de paredes de arriostamiento para la presa del río El Salto..... | 145 |
| Tabla 85: Cantidad de acero para la presa del río El Salto | 146 |
| Tabla 86: Áreas de pantalla y contrafuertes para la presa del río Pita | 146 |
| Tabla 87: Áreas de paredes de arriostamiento para la presa del río Pita..... | 147 |
| Tabla 88: Cantidad de acero para la presa del río Pita | 147 |
| Tabla 89: Presupuesto presa mixta (Río El Salto)..... | 148 |
| Tabla 90: Presupuesto presa mixta (Río Pita)..... | 149 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Volcán Cotopaxi | 1 |
| Figura 2. Cráter del volcán Cotopaxi | 2 |
| Figura 3. Ubicación volcán Cotopaxi | 5 |
| Figura 4. Depósitos riolíticos y andesíticos del Cotopaxi I | 7 |
| Figura 5. Depósitos de la erupción riolítica en el Cotopaxi II-A | 9 |
| Figura 6. Depósitos asociados a las erupciones de los últimos 1200 años del Cotopaxi | 10 |
| Figura 7. Depósitos asociados a la erupción del 26 de Junio de 1877 | 13 |
| Figura 8. Principales peligros volcánicos | 14 |
| Figura 9. Esquema de derrumbe de un flanco | 16 |
| Figura 10. Paisaje con hummocks | 17 |
| Figura 11. Partes características de un lahar | 19 |
| Figura 12. Cúpula de la fábrica Textil “San Gabriel” (Latacunga) | 22 |
| Figura 13. Volcán Cotopaxi con nubarrones de humo y ceniza | 23 |
| Figura 14. Flujos Piroclásticos | 24 |
| Figura 15. Colada de lava que fluyó por el noreste del volcán Cotopaxi..... | 27 |
| Figura 16. Tipos de sismo volcánicos presentados en el volcán Cotopaxi .. | 28 |
| Figura 17. Presa y sus Partes Principales | 29 |
| Figura 18. Rellenos de Tierra y Enrocados en la Construcción | 30 |
| Figura 19. Presa de Tierra | 32 |
| Figura 20. Presa de Enrocado Kleine Kinzig | 34 |
| Figura 21. Presa de Gaviones..... | 35 |
| Figura 22. Presas de hormigón | 35 |
| Figura 23. Presa de gravedad..... | 36 |
| Figura 24. Presa de arco..... | 36 |
| Figura 25. Presa de contrafuertes..... | 37 |
| Figura 26. Barrera Flexible a Base de Redes de Anillos | 38 |
| Figura 27. Presa SABO de hormigón | 39 |
| Figura 28. Presas SABO de tubos de acero | 40 |
| Figura 29. Presa SABO de concreto con hendidura | 41 |
| Figura 30. Presa mixta | 41 |
| Figura 31. Morfología de la cuenca norte del volcán Cotopaxi | 42 |
| Figura 32. Lugar implantación de la presa mixta para el Río El Salto..... | 44 |
| Figura 33. Lugar implantación de la presa mixta para el Río Pita | 44 |
| Figura 34. Topografía del sector norte del volcán Cotopaxi..... | 45 |
| Figura 35. Ubicación geográfica del proyecto | 46 |
| Figura 36. Comparación de las coberturas glaciares 1976-2006 para el volcán Cotopaxi | 47 |
| Figura 37. Área de aporte para la cuenca hidrográfica del río El Salto..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 38. Área de aporte para la cuenca hidrográfica del río Pita | 50 |
| Figura 39. Ubicación de los seis puntos de estudio | 51 |
| Figura 40. Punto de cierre para el punto 1 (Río El Salto)..... | 53 |
| Figura 41. Curva característica del embalse para el punto 1 (Río El Salto) | 53 |
| Figura 42. Punto de cierre para el punto 3 (Río Pita)..... | 54 |
| Figura 43. Curva característica del embalse para el punto 3 (Río Pita) | 55 |
| Figura 44. Perfil transversal - Área de corte para el punto 1 (Río El Salto). | 57 |
| Figura 45. Perfil Transversal (Abscisa -480 a -160) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita) | 58 |
| Figura 46. Perfil Transversal (Abscisa -160 a 200) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita) | 58 |
| Figura 47. Perfil Transversal (Abscisa 200 a 560) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita) | 59 |
| Figura 48. Perfil Transversal (Abscisa 560 a 840) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita) | 59 |
| Figura 49. Hidrograma | 60 |
| Figura 50. Cuenca hidrográfica superficial para el río El Salto | 68 |
| Figura 51. Cuenca hidrográfica superficial para el río Pita..... | 70 |
| Figura 52. Histograma..... | 74 |
| Figura 53. Curva empírica (Escala natural)..... | 76 |
| Figura 54. Curva teórica (Escala natural)..... | 77 |
| Figura 55. Curva ajustada $C_s=2C_v$ | 77 |
| Figura 56. Línea de refracción para los puntos 1 y 3 | 79 |
| Figura 57. Explosivo y explosión en uno de los extremos..... | 79 |
| Figura 58. Domocrona – disparos directo y reverso..... | 80 |
| Figura 59. Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad | 80 |
| Figura 60. Tomografía de la línea sísmica | 81 |
| Figura 61. Perfil de sísmica de refracción (V_p) | 81 |
| Figura 62. Tendencia de las primeras llegadas..... | 82 |
| Figura 63. V_{S30} | 82 |
| Figura 64. Tendencia de las primeras llegadas..... | 83 |
| Figura 65. V_{S30} | 83 |
| Figura 66. Domocrona – disparos directo y reverso..... | 84 |
| Figura 67. Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad | 84 |
| Figura 68. Tomografía de la línea sísmica | 85 |
| Figura 69. Perfil de sísmica de refracción (V_p) | 85 |
| Figura 70. Tendencia de las primeras llegadas..... | 86 |
| Figura 71. V_{S30} | 86 |
| Figura 72. Tendencia de las primeras llegadas..... | 87 |
| Figura 73. V_{S30} | 87 |
| Figura 74. Ensayo de contenido de humedad..... | 89 |
| Figura 75. Ensayo de densidad varillada | 91 |

| | |
|--|-----|
| Figura 76. Ensayo de peso específico y absorción del árido grueso | 92 |
| Figura 77. Ensayo de gravedad específica y absorción del árido fino | 93 |
| Figura 78. Ensayo de carga puntual | 94 |
| Figura 79. Ensayo de corte directo | 95 |
| Figura 80. Deformación horizontal vs. Esfuerzo de corte..... | 98 |
| Figura 81. Envolvente | 99 |
| Figura 82. Presa mixta (Almaty, Kazajistán) | 100 |
| Figura 83. Franja de diseño | 101 |
| Figura 84. Geometría del contrafuerte | 101 |
| Figura 85. Pantalla y paredes de arriostramiento..... | 102 |
| Figura 86. Relleno de material suelto (Suelo) | 103 |
| Figura 87. Empuje del lahar | 105 |
| Figura 88. Zonas sísmicas y valor del factor de zona z (Ecuador)..... | 108 |
| Figura 89. Fuerzas sísmicas | 110 |
| Figura 90. Centro de gravedad de AutoCAD | 110 |
| Figura 91. Seguridad al deslizamiento | 112 |
| Figura 92. Circulo de falla de radio R..... | 113 |
| Figura 93. Presa de materiales sueltos – Análisis estático | 115 |
| Figura 94. Presa de materiales sueltos – Análisis pseudoestático..... | 115 |
| Figura 95. Vertedero de cresta ancha..... | 116 |
| Figura 96. Geometría del flujo en un vertedero de caída recta | 119 |
| Figura 97. Curva de remanso para el río El Salto | 120 |
| Figura 98. Ángulo de alabeo de una alcantarilla | 121 |
| Figura 99. Canal de rápidas con tapa y columpio | 122 |
| Figura 100. Canal de rápidas con tapa y columpio (Río El Salto) | 123 |
| Figura 101. Franja de diseño | 125 |
| Figura 102. Geometría del contrafuerte | 125 |
| Figura 103. Pantalla y paredes de arriostramiento..... | 126 |
| Figura 104. Relleno de material suelto (Suelo) | 127 |
| Figura 105. Empuje del lahar | 129 |
| Figura 106. Fuerzas sísmicas | 132 |
| Figura 107. Centro de gravedad de AutoCAD..... | 133 |
| Figura 108. Seguridad al deslizamiento | 134 |
| Figura 109. Presa de materiales sueltos – Análisis estático | 136 |
| Figura 110. Presa de materiales sueltos – Análisis pseudoestático..... | 136 |
| Figura 111. Curva de remanso para el río Pita | 138 |
| Figura 112. Canal de rápidas con tapa y columpio (Río Pita) | 140 |
| Figura 113. Vista en planta de la presa para el río El Salto | 141 |
| Figura 114. Vista en planta de la presa para el río Pita | 142 |
| Figura 115. Corte típico de muro (Pantalla y contrafuertes)..... | 143 |
| Figura 116. Corte típico de muro (Paredes de arriostramiento) | 144 |

RESUMEN

El trabajo de titulación “DISEÑO DE OBRAS DE PROTECCIÓN ANTE EL FLUJO DE LOS LAHARES DEL VOLCÁN COTOPAXI PARA LA CUENCA NORTE”, consiste en el diseño hidráulico de presas mixtas compuestas de hormigón y tierra para los ríos El Salto y Pita, estas presas ejercen la función de retener el flujo de lodo y escombros (lahares), procedentes del casquete glaciar del volcán Cotopaxi en caso de existir un nuevo episodio eruptivo de gran magnitud. Este proyecto contiene el análisis de la ubicación de las obras en base a la topografía de la zona, el estudio hidrológico para los ríos El Salto y Pita, la determinación del volumen del lahar que se embalsa en cada punto de cierre en función del área del casquete glaciar, se realiza el ensayo de sismica de refracción para conocer la estratigrafía de cada lugar seleccionado, se diseñan las respectivas obras de protección ante el flujo de los lahares, se presentan las obras de conducción que ayudan a los ríos a seguir sus condiciones normales, se plantea el diseño de las estructuras de vertimiento y finalmente se realiza un presupuesto aproximado de las obras propuestas. Este proyecto tiene la finalidad de salvaguardar las vidas humanas de los habitantes de las zonas de San Rafael, Sangolquí y poblaciones vecinales y proteger la infraestructura civil la cual ha ido creciendo considerablemente.

PALABRAS CLAVE:

- **VOLCÁN COTOPAXI**
- **OBRAS DE PROTECCIÓN**
- **LAHARES**
- **PRESA MIXTA**
- **RÍO EL SALTO**
- **RÍO PITA**

ABSTRACT

The titling project "DESIGN WORKS OF PROTECTION AGAINST THE FLOW LAHARS VOLCANO COTOPAXI BASIN NORTH" consists of the hydraulic design of mixed dams made of concrete and earth for rivers El Salto and Pita, these dams exercise function of retaining the flow of mud and debris (lahars) from the icecap of Cotopaxi volcano in the event of a new eruptive episode of great magnitude. This project contains an analysis of the location of the works based on the topography of the area, the hydrological study for rivers El Salto and Pita, determining the volume of lahar impounded at each point of closing depending on the area icecap, the test seismic refraction is performed to determine the stratigraphy of each selected place, the respective protection works are designed to flow lahars, works driving that help rivers to follow their normal conditions occur , arises the design of structures and finally shedding an estimated budget of the proposed work is done. This project aims to safeguard the lives of the inhabitants of the areas of San Rafael, Sangolquí and neighborhood populations and protect civil infrastructure which has grown considerably.

KEYWORDS

- **COTOPAXI VOLCANO**
- **PROTECTION WORKS**
- **LAHARS**
- **MIXED DAM**
- **EL SALTO RIVER**
- **PITA RIVER**

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES

1.1 Antecedentes

El volcán Cotopaxi es parte del Arco Volcánico Ecuatoriano con una elevación de 5.897 m.s.n.m. y es valorado como uno de los volcanes activos más peligrosos del mundo debido a la periodicidad de sus erupciones, su estilo eruptivo, su relieve y su cobertura glaciar. Este volcán presenta cinco grandes periodos eruptivos: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1853-1854 y 1877-1880 (Ordóñez, Samaniego, Mothes, & Schilling, 2013).

Los eventos volcánicos asociados a todas esas erupciones son:

- Caídas de ceniza, pómez y otros.
- Coladas de lava.
- Flujos piroclásticos.
- Flujos de lodo y escombros (lahares).



Figura 1. Volcán Cotopaxi

Fuente: (Defaz, 2015)

Según el IG-EPN (2012), el cono volcánico del Cotopaxi tiene una forma geométrica regular, como se observa en la Figura 1. La parte más alta del

cono está recubierta por una gruesa capa de hielo glacial que en la actualidad, se extiende desde los 4.600 m de altura. La base del cono tiene 22 km de diámetro y sus laderas una inclinación de 35°, el diámetro del cráter es de 800 m y su profundidad de 334 m, hasta el piso ocupado por un pequeño cono piroclástico.

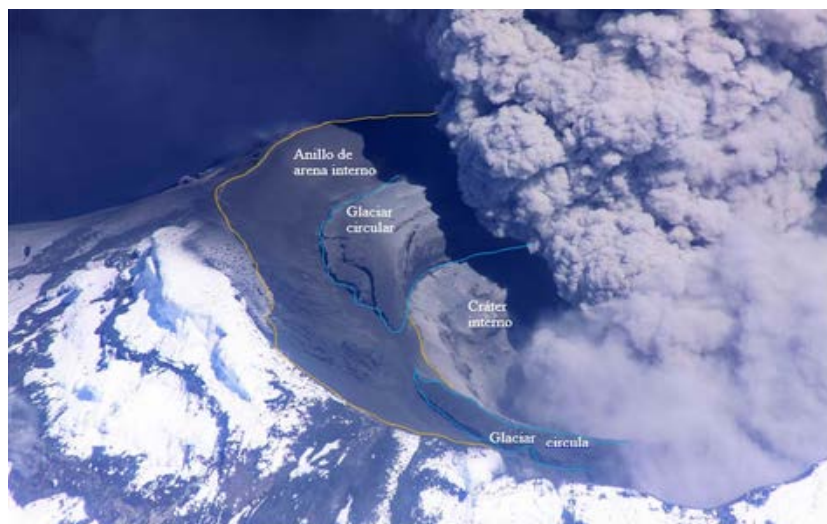


Figura 2. Cráter del volcán Cotopaxi

Fuente: (Ramón, 2015)

Diversas investigaciones constatan que el volcán Cotopaxi tiene intensa actividad reciente y predisposición para originar lahares que se trasladan a una velocidad de hasta 100 km/hora y en caso de fusión del glacial se produciría 156'000.000 m³ de agua, que transitarían por drenajes de zonas densamente pobladas como el Valle Interandino entre Mulaló, Latacunga, y una parte del valle de los Chillós, por ende se considera que los lahares pueden afectar a pueblos y ciudades que se encuentren en su camino con millones de toneladas de escombros volcánicos, arrastrando cualquier objeto que encuentre a su paso (Secretaría de Gestión de Riesgo, 2015).

Según Ordoñez y otros (2013), los lahares son flujos densos que se desplazan ladera abajo por los drenajes naturales de un volcán debido a la acción de la gravedad y consisten de una mezcla de agua (fase líquida) y de

materiales volcánicos (fase sólida) como grandes rocas, arena, ceniza e incluso troncos de árboles, que pueden ser arrastrados por el flujo de lodos.

En la actualidad alrededor de 300.000 personas viven cerca del volcán o cerca de los drenajes importantes tales como ríos y quebradas. La red hidrográfica del volcán Cotopaxi se encuentra formada por tres sub-redes principales:

Norte: Se inicia con los ríos Pita y El Salto, que drenan la parte nororiental y norte, respectivamente, del cono.

Oriental: Los lahares del Cotopaxi también transitan por los ríos Tambo, Tamboyacu, Valle Vicioso y Jatunyacu, que forman la Cuenca del Napo.

Sur: Los ríos Cutuchi, Saquimala y Alaquez drenan el flanco sur y suroccidental del cono del Cotopaxi, constituyen las cabeceras de la subcuenca del Río Patate (Aguilera & Toulkeridis, 2004-2005).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de Obras de Protección compuestas por presas mixtas y obras de desagüe que permiten retener la mayor cantidad de sólidos del flujo de lodo para la cuenca norte; producto de una erupción del volcán Cotopaxi, que corresponden a los Ríos El Salto y Pita.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recopilar información de campo necesaria para el análisis de la Cuenca del Río El Salto y la Cuenca del Río Pita.
- Establecer las zonas de cierre y de ubicación adecuadas de acuerdo a la topografía para la implantación de las obras de mitigación en los Ríos El Salto y Pita.

- Analizar el volumen de almacenamiento del flujo de lodo y escombros para el diseño de las obras de mitigación para los Ríos El Salto y Pita.
- Determinar los datos Hidrológicos y Morfológicos de las Cuencas de los Ríos El Salto y Pita.
- Diseñar las obras de protección más adecuadas de manera que cumplan con requerimientos del problema.
- Establecer un presupuesto aproximado de las obras propuestas.

1.3 Justificación del proyecto

Los desastres naturales se presentan en todo el mundo y las poblaciones cercanas a estos eventos son las más afectadas, por ende el hombre ha visto la necesidad de realizar obras de mitigación para la prevención de inminentes desastres, de tal manera de salvaguardar la vida y minorar los daños económicos, sociales y ambientales causados por los fenómenos naturales.

En Ecuador la mayoría de las ciudades están ubicadas en zonas expuestas a más de un peligro natural como pueden ser: terremotos, erupciones volcánicas, inundaciones o deslizamientos.

Según Luis Sodiro (1877) y Teodoro Wolf (1878), el volcán Cotopaxi, cuya última fase eruptiva ocurrió en 1877 causó aproximadamente un millar de víctimas, tomando en cuenta que en ese tiempo las zonas afectadas eran poblaciones rurales.

En la actualidad, debido al latente peligro en el cual se encuentran los moradores de las poblaciones de San Rafael, Sangolquí y demás zonas vecinales ubicados a lo largo de la cuenca norte del volcán, principalmente, ante el flujo de lahares producidos por el coloso al momento de generarse una erupción volcánica nos hemos visto en la obligación de realizar el estudio y diseño de obras de protección para el control de lahares para dicha cuenca. Con la finalidad que se puedan tomar medidas urgentes, mismas que permitirán aminorar la vulnerabilidad existente, de manera que, en caso de ocurrir un nuevo episodio eruptivo, exista la preparación adecuada para poder salvaguardar la mayor cantidad de vidas humanas.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Descripción de la localización geográfica del volcán Cotopaxi

El Volcán Cotopaxi se encuentra sobre la Cordillera Oriental (Real), a una distancia de 35 km al Noreste de Latacunga y de 45 km al Sureste de Quito. Según el IG-EPN, su edificio forma un cono simétrico con pendientes de hasta 35° y un diámetro basal de ~20 km, el diámetro del cráter varía entre 800 m en sentido Norte-Sur y 650 m en sentido Este-Oeste. El Cotopaxi está rodeado por páramos que bordean los 3000 msnm y por otros volcanes como Sincholagua (4873 msnm), Quilindaña (4876 msnm) y Rumiñahui (4722 msnm). (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2012). En la Figura 3, se presenta la ubicación del volcán Cotopaxi.



Figura 3. Ubicación volcán Cotopaxi

Fuente: (Google maps, 2016)

2.2 Historia geológica del volcán Cotopaxi

Andrade, y otros (2005), describen que el volcán Cotopaxi tiene una historia de actividad realmente grande. El panorama y las formas que hoy en día apreciamos son el resultado de una serie compleja de continuos eventos geológicos y volcánicos. El Coloso ha llamado la atención de científicos e investigadores desde hace ya varios períodos. Por tal, las primeras indagaciones del volcán y sus erupciones fueron hechas por científicos como La Condamine (1751), Humboldt (1810), Reiss (1874), Sodiro (1877), Wolf (1878, 1904), Whympfer (1892), Stübel (1903), Reiss y Stübel (1904) y Martínez (1932a, 1932b). Los estudios con mayor importancia y sus peligros potenciales más recientes han sido realizados por Hradecka, et al. (1974), Hall (1977), Miller, et al. (1978), Hall y Hillebrandt (1988a, 1988b), Hall y Mothes (1992), Barberi, et al. (1995), Mothes, et al. (1998), Hall, et al. (2004a, 2004b y 2005) y Ettinger, et al. (2005).

2.2.1 Período pre - histórico

En una primera etapa según Andrade, y otros (2005), los vestigios más antiguos de la actividad volcánica del Cotopaxi tienen más de 500000 años de edad, por tal motivo se lo ha llama "Cotopaxi I". Hoy en día, dichas muestras se encuentran solamente en el flanco sur y sur-occidente del cono actual, en las quebradas de los ríos Barrancas (Simarrones), Burrohuaicu, Saquimala y San Lorenzo, en aquella época el Cotopaxi I tuvo una actividad que se caracterizó por presentar erupciones de magma riolítico. En aquel período, el Cotopaxi estaba formado por un conjunto de domos de lava riolítica alineados sobre una fractura arqueada de 8 km de largo. Cuando se produjeron erupciones muy explosivas, se generaban flujos piroclásticos y gran caída de ceniza y pómez. En las erupciones poco explosivas se formaron domos de lavas riolíticas y de obsidiana que en la actualidad se puede apreciar en el cono.

Posteriormente se produjo el período que estuvo caracterizado por la aparición de magmas de tipo andesítico que ocurrió poco tiempo después de

420000 años antes del presente, como se puede observar en la Figura 4, en esta época se originaron erupciones que eran menos explosivas y se presentaron grandes flujos de lava y poca caída de escoria y ceniza volcánica, en base a estos escenarios paulatinamente se fue construyendo un edificio cónico posiblemente equivalente al actual. A medida que este volcán andesítico se construía, también estuvo sujeto a fuertes fenómenos de erosión por glaciares y por ríos. Evidencias importantes de este período también se observan a lo largo del cañón del río Pita, al norte del Cotopaxi.

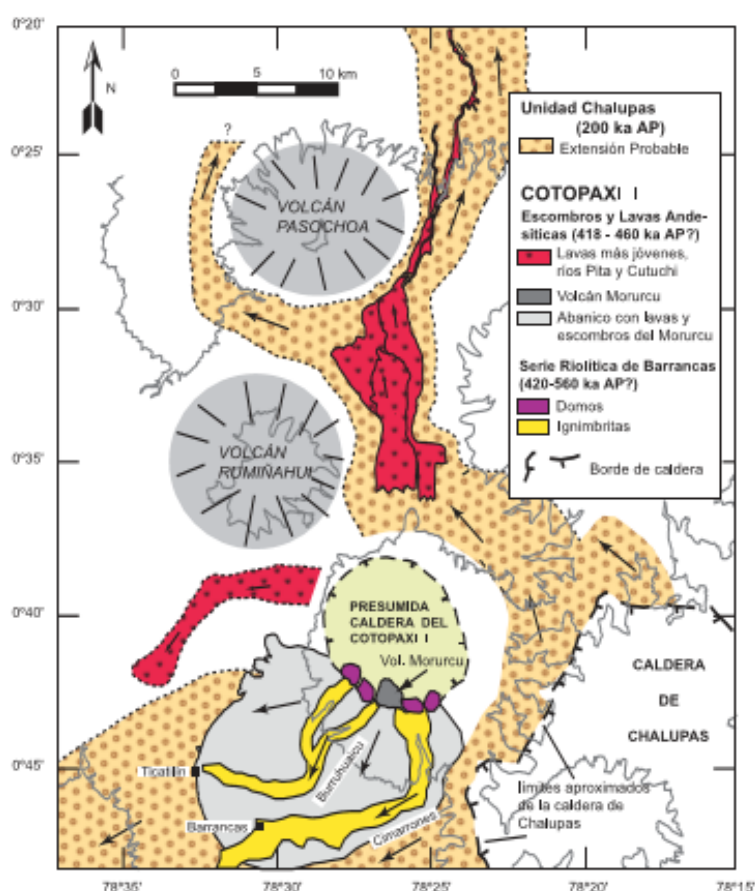


Figura 4. Depósitos riolíticos y andesíticos del Cotopaxi I

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

A continuación del período andesítico, parece que el volcán entró en una larga pausa de actividad que se desarrolló por cerca de 350000 años, a pesar de este acontecimiento en esta época se depositaron y cubrieron la zona del

volcán dos importantes Unidades geológicas, producto de la intensa actividad volcánica en zonas cercanas de los Andes ecuatorianos. La primera es la Unidad Cangahua, que consiste en un depósito de color café claro hasta habano, de varios metros de espesor, compuesto de varias capas sucesivas de cenizas finas endurecidas. La segunda capa es la Unidad de la Ignimbrita Chalupas, que es un enorme depósito de varios metros de espesor, de color gris claro hasta casi blanco y que contiene abundante ceniza y pómez fibrosa de color blanco o grisáceo (Andrade, y otros, 2005).

Se conoce que existe una segunda etapa de gran actividad que empezó hace 13200 años AP, donde el volcán empezó a construir nuevamente un edificio, el que fue denominado como "Cotopaxi II-A", un rasgo muy peculiar de este suceso fue que se presentaron una serie de erupciones riolíticas entre 13200 y 4500 años AP. Como presentaba un escenario de erupciones muy explosivas se produjeron extensas caídas de pómez y ceniza, como se puede observar en la Figura 5. Algunas de las cuales tienen espesores importantes incluso en las zonas actuales de Sigchos, Quito, Papallacta, Cosanga y Coca.

En cuanto a la última erupción riolítica que ocurrió hace 4500 años AP, la cual fue considerada desastrosa puesto que posiblemente se constituyó un gran edificio volcánico que se volvió inestable en el transcurso de esta erupción. Como resultado de este acontecimiento, un gran sector del flanco noreste del edificio se derrumbó formando una avalancha de escombros de $2,1 \text{ km}^3$, en la actualidad los vestigios forman el gran campo de colinas de decenas de metros de altura que se observan al pie noreste del cono. Además, se produjeron grandes flujos piroclásticos y existió gran porción de glaciación que se derritió instantáneamente, dando lugar a la formación de un lahar de gran tamaño conocido como "Lahar del Valle de Los Chillos". Este flujo de lodo es posiblemente el más grande que se formó en el Cotopaxi en toda su historia y fluyó por los ríos Pita, San Pedro y Guayllabamba hasta llegar al océano Pacífico por medio del río Esmeraldas. El volumen de los lahares fue de $3,8 \text{ km}^3$. Al terminar este suceso alrededor de la cuarta parte del Cotopaxi II A quedó destruida (Andrade, y otros, 2005).

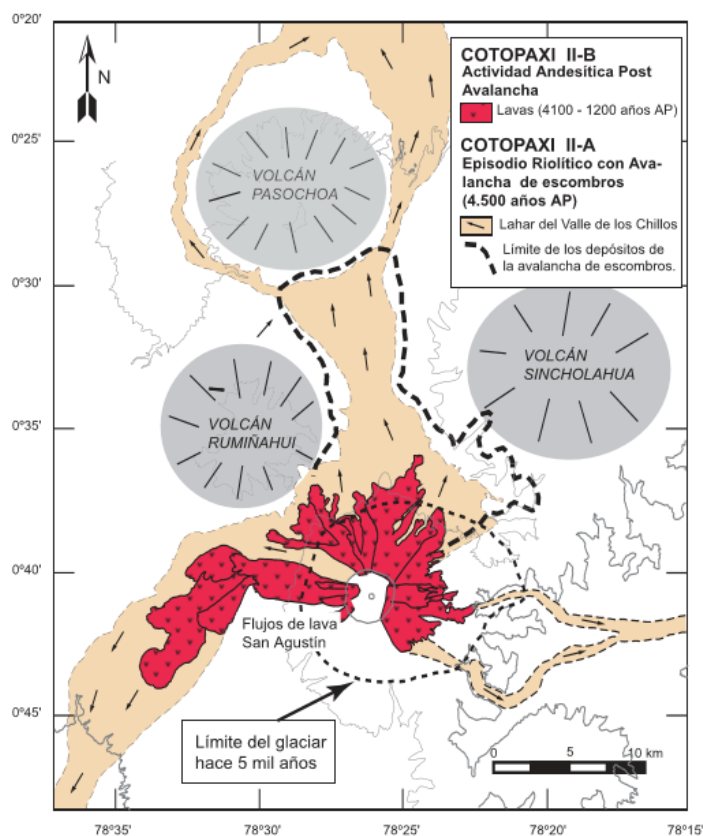


Figura 5. Depósitos de la erupción riolítica en el Cotopaxi II-A

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

Según Andrade, y otros (2005), entre 4060 y 1195 años AP se produjeron grandes erupciones de coladas de lava que fluyeron sobre todo al norte, este y oeste del cono actual, y de esta manera aportaron a la formación del Cotopaxi II-B. Figura 6. Cada ciclo se caracteriza por un patrón de fenómenos eruptivos similares, los mismos que incluyen caídas plinianas de escoria o pómez, flujos piroclásticos de escoria o pómez, coladas de lava y extensos flujos de escombros (lahares).

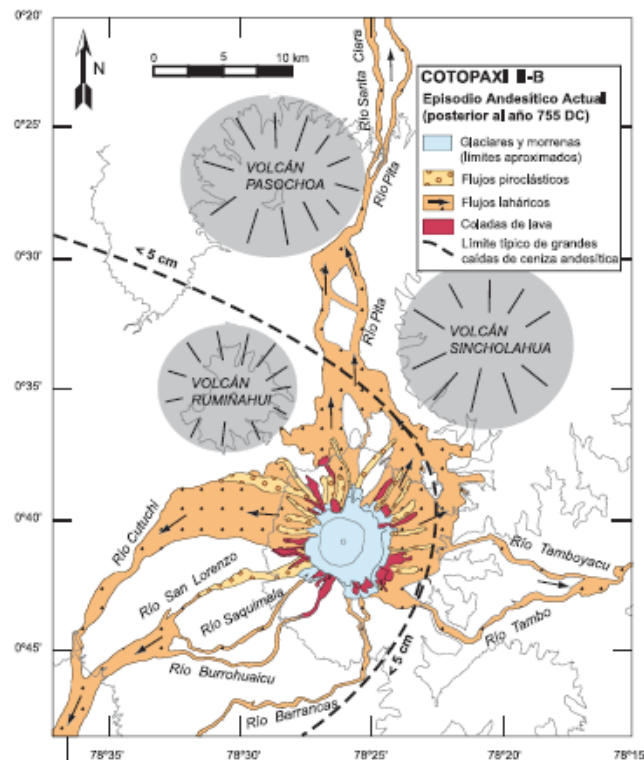


Figura 6. Depósitos asociados a las erupciones de los últimos 1200 años del Cotopaxi

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

2.2.2 Período histórico

Algunas culturas pre-hispánicas del Ecuador fueron testigos de muchas erupciones del Cotopaxi y posiblemente conocieron acerca de su tipo de actividad y peligros asociados, pero, esos conocimientos no fueron registrados en lengua escrita. A partir de la llegada de los españoles a tierras ecuatorianas, en 1532, empieza a describirse la historia de las erupciones del Cotopaxi. Así, se sabe que durante los últimos 500 años el Cotopaxi ha tenido ciclos eruptivos con un promedio de una vez por siglo, los mismos que ocurrieron en: 1532-1534, 1742-1744, 1766-1768, 1854-1855 y 1877-1880. Se han cumplido 138 años desde la última gran erupción, ocurrida el 26 de junio de 1877. (Andrade, y otros, 2005).

En el siglo XVIII según Andrade y otros (2005), el volcán Cotopaxi supuestamente estaba en un período de tranquilidad que duró más de 200

años, después de las erupciones que fueron registradas en el primer ciclo (1532-1534). No obstante, entre junio y diciembre de 1742 ocurrieron erupciones explosivas que causaron lluvias de ceniza y lahares, los cuales destruyeron puentes, casas, obrajes y haciendas, y existió pérdida de vidas humanas.

Andrade, y otros (2015), redactan que, en 1743 y a principios y mediados 1744, la actividad del volcán se caracterizó por emisiones de ceniza y pequeñas explosiones. Pero en noviembre de 1744 nuevamente ocurrió un escenario eruptivo donde se produjeron flujos piroclásticos que derritieron partes del glaciar del volcán y estos aportaron a la formación de lahares, aún mayores que los de 1742.

Dos décadas después en los valles de Latacunga y Los Chillos, en febrero de 1766 y en abril de 1768, ocurrieron nuevas grandes erupciones del Cotopaxi. En ambos casos se volvieron a producir lahares por derretimiento del glaciar del volcán, pero además las lluvias de ceniza asociadas a las erupciones fueron tan extensas que llegaron incluso hasta Pasto (Colombia) (Andrade, y otros, 2005).

En el siglo XIX, a partir de la última erupción registrada en 1768 reiteradamente se produjo un período de baja actividad volcánica con un tiempo de duración de 86 años, en este período se generaron ocasionalmente algunas emisiones de ceniza y pequeñas explosiones. Pese al escenario que presentaba, en septiembre de 1853 hubo gran incremento en la actividad y causó caídas de ceniza y lahares destructivos en el río Cutuchi. Posterior a este acontecimiento el 12 y 13 de septiembre de 1854 en Quito se presentó una lluvia de ceniza imputada al Cotopaxi.

2.2.2.1 La última gran erupción del 26 de junio de 1877

A principios de 1877, el Coloso empezó a presentar manifestaciones de ceniza y explosiones de tamaño pequeño a moderado. En junio del mismo año, la actividad se había incrementado significativamente, de manera que el

día 26 se produjo una fase eruptiva de una magnitud capaz de formar flujos piroclásticos, que se produjeron en el perímetro del cráter, sobre el borde más bajo y también sobre la cúspide más alta, este fenómeno tuvo una duración de tiempo de entre 15-30 minutos, ocurrió de forma violenta con una gran ebullición de las masas ígneas desde el cráter que rápidamente cubrieron todo el cono del Cotopaxi.

No obstante, los acontecimientos más trascendentes del 26 de junio fueron los lahares, se presentan en la Figura 7, que ocurrieron en los ríos Pita, Cutuchi y Tamboyacu, debido a la gran destrucción que provocaron a todo lo largo de los tres drenajes. El origen de los lahares fue el brusco y extenso derretimiento que sufrió parte del glaciar del Cotopaxi al tomar contacto con los flujos piroclásticos. Los lahares fueron tan caudalosos que desbordaron fácilmente los cauces naturales de los ríos, de manera que hubo extensas inundaciones de lodo y desastres en las zonas aledañas. Los lahares tuvieron velocidades de alrededor de media hora en llegar a Latacunga, menos de 1 hora en llegar al Valle de los Chillos, casi tres horas en llegar a la zona de Baños (Tungurahua) y cerca de 18 horas en llegar a la desembocadura del río Esmeraldas en el océano Pacífico.

Del mismo modo se produjo una importante lluvia de ceniza, este acontecimiento ocurrió principalmente en las zonas que se encuentran al occidente y noroccidente del volcán, debido a la dirección de los vientos. Una de las poblaciones más afectadas por este suceso fue Machachi, donde se depositó una capa de casi 2 cm de espesor. En Quito la acumulación llegó a los 6 mm, siendo menor en Latacunga y ausente al sur de Ambato, también se presentaron reportes de lluvias de ceniza ocurridas en las provincias de Manabí y Esmeraldas y en Guayaquil la lluvia de ceniza empezó el 26 de junio en la mañana y con interrupciones duró hasta el 1 de julio, las acumulaciones de ceniza fueron de pocos milímetros espesor sobre la zona costera del Ecuador.

La erupción del 26 de junio de 1877 puede ser considerada como la “erupción típica” del Coloso (Andrade, y otros, 2005).

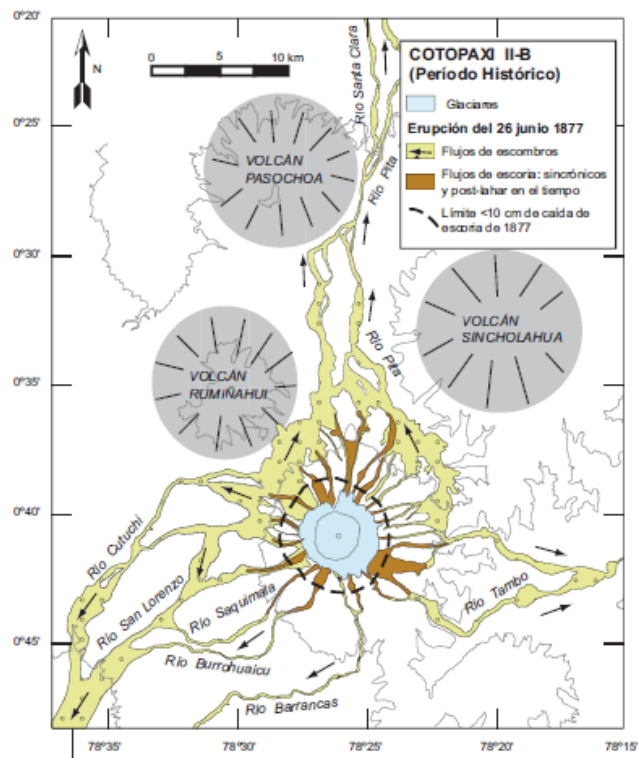


Figura 7. Depósitos asociados a la erupción del 26 de Junio de 1877

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

2.3 Riesgo volcánico

El riesgo volcánico es un conocimiento que se basa fundamentalmente en las últimas erupciones catastróficas acontecidas, donde existe pérdida de vidas humanas y se estudia al impacto y difusión que éstas han tenido en los medios de comunicación. También enfatiza la labor de concienciación y anunciación que es realizada por varios organismos oficiales de todo el mundo, en donde se toman en cuenta las diferentes iniciativas. Como, el programa “Década para la Mitigación de los Desastres Naturales 1990-2000”, declarado por Naciones Unidas, dicho programa inicio después de la catástrofe ocurrida por la erupción del Nevado de Ruiz en Colombia en 1985.

En los últimos años se ha estado promoviendo una cultura para la mitigación de los desastres naturales.

Considerando la metodología actual, existe un error usual que es asociar el riesgo volcánico y el riesgo sísmico, cuando sólo tienen en común ser los desastres naturales más rimbombantes pertenecientes a la actividad interna de nuestro planeta. La principal diferencia que se da entre ambos radica en que el riesgo sísmico representa un peligro único, los terremotos son casi instantáneos, mientras que la erupción volcánica puede extenderse durante meses y los factores de peligro que posee son múltiples, entre ellos: coladas lávicas, flujos de piroclastos y caída de cenizas, lahares y avalanchas, gases, sismos volcánicos, tsunamis, entre otros. Figura 8. (Volcanes de Canarias, 2012).

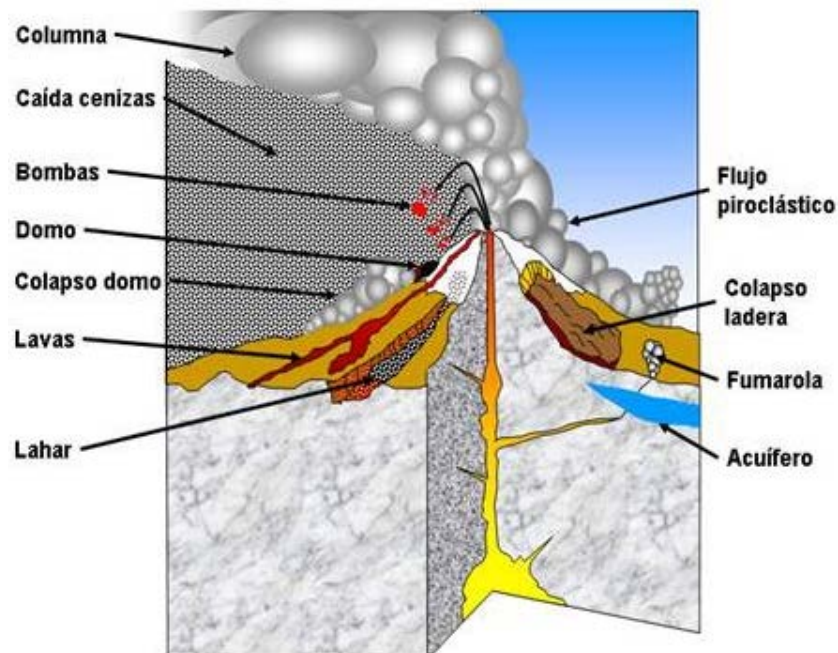


Figura 8. Principales peligros volcánicos

Fuente: (Volcanes de Canarias, 2012)

El riesgo volcánico de acuerdo con Aguilera & Toulkeridis (2004-2005) se lo puede representar de la siguiente manera:

$$R = \frac{P.V.S}{Q}$$

R representa el riesgo volcánico medido en una variable estadística.

P es la probabilidad de que un fenómeno volcánico concreto afecte a un territorio determinado en un tiempo determinado lo que es conocido como peligro volcánico, por tal motivo, la historia eruptiva de un volcán es un factor importante a la hora de determinar su peligrosidad volcánica, al permitirnos definir de forma aproximada su estado actual o más reciente y prever su comportamiento en el futuro.

S significa el valor de los bienes sujetos a sufrir pérdidas, como el número de vidas humanas, bienes raíces y fuentes de producción ubicadas en el área de riesgo.

V representa la vulnerabilidad de esos bienes, se refiere a la proporción en la que pueden ser dañados los valores **S**, se estima en % y existe una escala de daños de tres niveles: ligero (0-20%), moderado (10-60%) y grave (50-100%).

Finalmente **Q** constituye la respuesta social o el grado de preparación del hombre para reducir la vulnerabilidad y el valor vulnerable y, con ello, el riesgo.

Por ende, está claro que mientras mayor sea el grado de preparación (**Q**) del hombre frente a una posible erupción volcánica se podrá reducir el riesgo, si es que logra disminuir la vulnerabilidad o el valor expuesto.

Frente al último acontecimiento que presenciamos ante el Coloso nos hemos visto en la necesidad de concienciar y prepararnos ante cualquier eventualidad que se pueda presentar (Aguilera & Toulkeridis, 2004-2005).

2.4 Fenómenos eruptivos del volcán Cotopaxi

A continuación se despliega los diferentes fenómenos volcánicos que se pueden presentar durante una erupción del volcán Cotopaxi.

- Avalanchas de Escombros.
- Flujos de Lodo y Escombros (Lahares).

- Lluvia de Ceniza y Piroclastos.
- Flujos Piroclásticos.
- Domos de Lava.
- Flujos de Lava.
- Gases Volcánicos.
- Sismos Volcánicos.

2.4.1 Avalanchas de escombros

Estas avalanchas de escombros son grandes colapsos o derrumbes de rocas que ocurren cuando los flancos de un volcán se vuelven inestables. La inestabilidad de los flancos de un volcán se presenta cuando sus pendientes exceden los 30° de inclinación, el desequilibrio de un volcán puede ocurrir debido al ascenso de una gran cantidad de magma en el edificio volcánico, o a un sismo de gran magnitud en las cercanías del volcán, o al debilitamiento de la estructura interna del volcán promovida por ejemplo por la alteración hidrotermal de las rocas que lo conforman (Andrade, y otros, 2005).

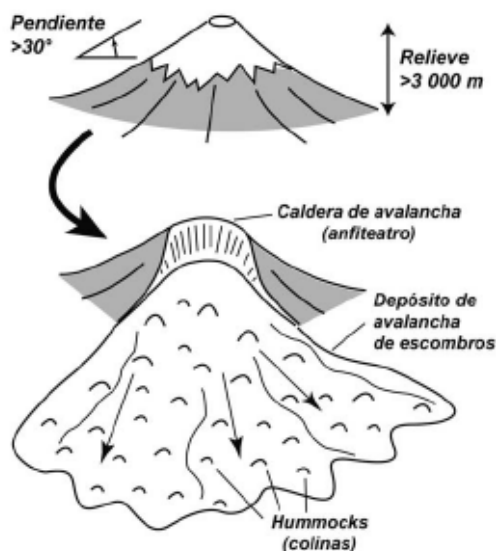


Figura 9. Esquema de derrumbe de un flanco

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

El colapso del flanco de un volcán se presenta por la composición de varios factores y el volumen de la avalancha puede ser muy variable (desde 0,01 hasta 15 km³). El colapso del flanco de un edificio y la avalancha de escombros puede estar procedida por erupciones explosivas, posiblemente puede destapar el conducto volcánico debido al gran deslizamiento y generar explosiones de extrema violencia conocidas como “blast” que provocan flujos piroclásticos de gran magnitud y alto poder destructivo.

Este acontecimiento se presentó en el período prehistórico hace 4500 años, el cual destruyó una parte del edificio del Cotopaxi II-A. La avalancha de escombros se dirigió en dirección norte y noreste hasta colisionar con los flancos bajos de los volcanes Sincholagua, Rumiñahui y Pasochoa, cubriendo una superficie de alrededor de 140 km² con una capa de escombros de decenas de metros de espesor. Hoy en día se puede constatar la zona que fue devastada por la avalancha ya que se encuentra un paisaje compuesto con una gran cantidad de pequeñas colinas conocidas como hummocks, como se puede observar en la Figura 10, los cuales eran enormes pedazos del Cotopaxi II-A y fueron transportados y depositados por la avalancha.



Figura 10. Paisaje con hummocks

Fuente: (Instituto Geofísico, 2015)

Dicho fenómeno es poco frecuente pero muy destructivo, puesto que todo lo que se encuentra en su camino es devastado por ende, las personas no tienen ninguna probabilidad de sobrevivir. Por lo que se recomienda la evacuación de las zonas latentemente afectadas, si la información científica señala la posibilidad de ocurrencia de un evento de estas características en el futuro cercano. Este evento no se presenta de manera inadvertida, por lo regular muestra señales premonitoras (Andrade, y otros, 2005).

2.4.2 Flujos de lodo y escombros (lahares)

Se denomina lahares a la mezcla de materiales volcánicos (partículas sólidas) como: rocas, piedra pómez y arena con agua proveniente de la fundición de un casquete glaciar, de la ruptura de un lago ubicado en un cráter o de fuertes lluvias. Los flujos se trasladan rápidamente ladera abajo por la fuerza de la gravedad hacia los valles, a grandes velocidades de hasta 100 km/h y siguiendo los drenajes naturales, de manera similar a un gran río de lodo y escombros con apariencia de una colada densa. Una vez formados, los lahares viajan por todo lo largo de los drenajes que los conducen, incitando mayores o menores daños según su volumen y velocidad, dado que se comportan de forma similar a una crecida de río o a un aluvión.

La configuración típica de un lahar en movimiento es representada por un cuerpo alargado, con un borde superior bastante plano, en el que se diferencian claramente tres segmentos caracterizados por una distinta concentración de sólidos. En la cabeza o frente de bloques, se almacenan los bloques de roca de gran tamaño, que han sido extraídos del cuerpo y se desplazan en seco. En el cuerpo la concentración de sólidos esta entre el 75 y 90% en peso y en la cola presenta una concentración de sólidos similar a la de un flujo hiperconcentrado del 45% en peso. Figura 11. (Aguilera & Toulkeridis, 2004-2005).

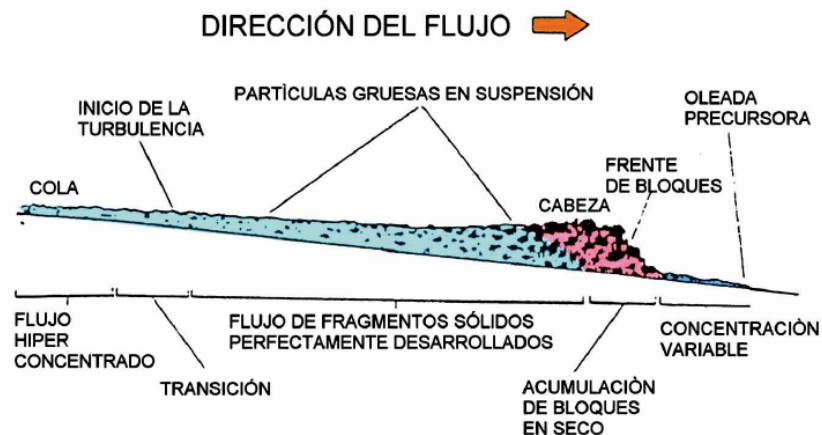


Figura 11. Partes características de un lahar

Fuente: (Aguilera & Toulkeridis, 2004-2005)

En cuanto al volcán Cotopaxi, según Andrade, y otros (2005), los lahares se pueden formar por dos mecanismos principales. El primero, los lahares más voluminosos y destructivos se forman cuando flujos piroclásticos desbordados desde el cráter provocan la fusión violenta de la nieve y el hielo en grandes sectores del casquete glaciar del volcán, estos lahares ocurren durante la erupción; a este tipo de flujos se conocen como lahares primarios. El segundo, los lahares de tamaños más modestos y en general con menor alcance lateral y longitudinal, estos se constituyen cuando las cenizas y piroclastos depositados por la erupción son trasladados por fuertes lluvias ocurridas en el volcán, ocurren después de meses o años posteriores a la erupción de un determinado volcán; estos son conocidos como lahares secundarios.

Los lahares se encuentran relacionados con la abundante presencia de materiales no cohesivos, que pueden ser fácilmente removidos y transportados por el agua.

En el volcán Cotopaxi se han presentado lahares primarios y secundarios durante las diferentes erupciones ocurridas en los últimos 2000 años. Se produjeron lahares primarios en las erupciones de los años 1742, 1743, 1744,

1766, 1768, 1855 y 1877, por el cauce del río Cutuchi (Al sur) han bajado un total de veinte lahares primarios en todos los anteriores años mencionados, mientras que por el río Pita (Al norte) han bajado tres lahares primarios en los años 1744, 1768 y 1877. En cuanto al río Tamboyacu se reportó que bajaron lahares primarios en las erupciones de 1744 y 1877, pero no hay suficiente información con respecto a las otras erupciones debido al aislamiento y lejanía de la zona.

Del mismo modo en las narraciones históricas existe información fehaciente de catástrofes, pérdidas cuantiosas y extensos daños provocados por los lahares que han bajado por los ríos Cutuchi y Pita, en donde han resultado particularmente afectados Latacunga al sur y los Valles de Los Chillos al norte respectivamente.

En el período prehistórico hace aproximadamente 4500 años se produjo el lahar más devastador de 3.8 km^3 , cuyos vestigios son aun visibles a lo largo de los ríos San Pedro y Guayllabamba, y hasta en la desembocadura del río Esmeraldas. Es poco posible que se presente un escenario como el de hace 4500 años en el futuro próximo ya que, por un lado, no se espera una erupción riolítica grande y por otro porque el volumen del casquete glaciar actual es menor que el de aquel tiempo.

En cuanto a la última erupción el 26 de junio de 1877 el volumen calculado para el lahar que bajo por el sistema del río es de aproximadamente $0,07 \text{ km}^3$ (70 millones de m^3), recorrió los 300 km que le separan de Esmeraldas en alrededor de 18 horas y en unos cuarenta minutos el tramo de 50 km hasta el Valle de Los Chillos. La alta energía, velocidad de desplazamiento, densidad y capacidad de arrastre hacen de los lahares o flujos de lodo, un fenómeno muy destructivo que ha cobrado una gran cantidad de víctimas humanas.

La falta de información y percepción ha hecho que los asentamientos humanos y grandes obras de infraestructura en la cercanía de los cauces por los que se transitan los lahares vayan aumentando de manera significativa,

puesto que los habitantes creen que están fuera del alcance de estos fenómenos.

Tabla 1

Víctimas causadas por lahares

| Volcán | País | Año | N° Víctimas |
|---------------|-------------|------------|--------------------|
| Kelut | Indonesia | 1586 | 10000 |
| Awu | Indonesia | 1711 | 3200 |
| Cotopaxi | Ecuador | 1741 | 1000 |
| Galunggung | Indonesia | 1822 | 4000 |
| Nevado Ruiz | Colombia | 1845 | 1000 |
| Awu | Indonesia | 1856 | 3200 |
| Cotopaxi | Ecuador | 1877 | 1000 |
| Awu | Indonesia | 1892 | 1530 |
| Kelut | Indonesia | 1919 | 5110 |
| Nevado Ruiz | Colombia | 1985 | 22000 |

Fuente: (Aguilera & Toulkeridis, 2004-2005)

En caso de suceder una erupción del Cotopaxi como cualquiera de las ocurridas en los últimos 4000 años, podría existir la presencia de lahares que son los fenómenos de mayor riesgo para los habitantes de la zona de Latacunga, el Valle de los Chillos y la cuenca media del Río Napo. Las personas alcanzadas por un lahar tienen muy pocas posibilidades de sobrevivir, por ende, durante una crisis volcánica se recomienda la evacuación de las zonas pobladas que se encuentren en los márgenes de drenajes peligrosos que bajan del volcán. Debido a su alta velocidad y densidad, los lahares primarios pueden mover y aun arrastrar objetos de gran tamaño y peso tales como: grandes árboles, vehículos, edificaciones, puentes, entre otros.

En la Figura 12 se puede apreciar la cúpula de la fábrica textil San Gabriel después de la destrucción que causaron los lahares en la ciudad de Latacunga.



Figura 12. Cúpula de la fábrica Textil “San Gabriel” (Latacunga)

Fuente: (Periodismo Ecuador, 2015)

2.4.3 Caída de ceniza y piroclastos

El material piroclástico corresponde a fragmentos de roca y piedra pómez que durante la explosión son expulsados desde el cráter. Se conoce como bombas volcánicas a los fragmentos de roca densos y de tamaño más representativo que siguen trayectorias balísticas y caen cerca del cráter.

En cuanto a la ceniza volcánica o lapilli se origina cuando el magma fragmentado en partículas finas (tefra), forma una columna ascendente que es impulsada hacia la atmósfera por la expansión de los gases y, posteriormente, por las corrientes de convección que genera el diferencial térmico entre la columna caliente y el aire frío que la rodea, donde son conducidas por el viento y caen a mayor distancia del cráter.

Las bombas y lapilli pueden cubrir áreas muy grandes cercanas al volcán con diferentes centímetros de espesor, esto va a depender del volumen de material emitido, la intensidad y duración de la erupción, la dirección y la velocidad del viento y la distancia al volcán.

La caída de ceniza y piroclastos han sido fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi y han estado presentes en los diferentes ciclos eruptivos de los últimos 2000 años. Han existido “nubarrones de humo y ceniza” y “columnas de fuego y lava” saliendo del cráter del volcán, de tal manera que dieron lugar a lluvias de ceniza en amplias zonas al occidente y norte del volcán, provocando grandiosas pérdidas en la agricultura y ganadería, y la destrucción de edificaciones antiguas que no soportaron su peso.



Figura 13. Volcán Cotopaxi con nubarrones de humo y ceniza

Fuente: (Díaz Lorenzo, 2015)

Luego de la erupción de 1877, en Quito se depositó una capa de ceniza de 6 mm de espesor y existen relatos que también hubo caídas de ceniza en las provincias de Guayas, Manabí y Esmeraldas.

La población puede verse afectada con espesores pequeños, menores a 1 mm de ceniza que puede incrementarse sustancialmente si se mezcla con agua, en donde el peso acumulado aumenta notablemente. Existen efectos negativos causados por las lluvias de ceniza estos son problemas de salud como irritación de los ojos y de las vías respiratorias, problemas con el ganado, destrucción de plantaciones, daños a los motores de vehículos,

aviones, maquinarias en general, contaminación de fuentes y reservorios de agua y riesgos de colapso de los techos, entre otros (Andrade, y otros, 2005).

2.4.4 Flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos provienen de mezclas calientes (frecuentemente de temperatura mayor a 500 °C) de gases, ceniza y fragmentos de roca, que descienden desde el cráter en forma de avalancha por los flancos del volcán, de manera que se desplazan a grandes velocidades, en algunos casos mayores a 200 kilómetros por hora, este fenómeno se presenta generalmente de forma súbita e impredecible durante fases eruptivas fuertes y explosivas. También es conocido con el nombre de nubes ardientes.



Figura 14. Flujos Piroclásticos

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

Los flujos piroclásticos están conformados de dos partes; un componente inferior, más denso, compuesto por ceniza, fragmentos de roca y bloques de escoria que se desplaza por el fondo de los valles y quebradas; y, un componente superior, menos denso pero más voluminoso, formado mayormente por ceniza volcánica y gases calientes, que se traslada por sobre

el componente inferior, pudiendo salir de los valles y sobrepasar relieves importantes.

Los flujos piroclásticos siempre han sido fenómenos muy comunes en las erupciones del Cotopaxi. Estos fenómenos se han presentado habitualmente todos los ciclos eruptivos de los últimos 2000 años, se los reconoce claramente por el sinfín de grandes bloques redondos de escoria negra que contienen sus depósitos.

En el volcán Cotopaxi los flujos piroclásticos se originan de tres formas:

1. Debido al desbordamiento del material piroclástico sobre el borde del cráter, este proceso es conocido como “boilling over” y ocurrió en la erupción de 1877.
2. Cuando existe colapso de una columna eruptiva que sea más densa que la atmósfera y por ende caiga por su propio peso.
3. Por el colapso del frente de una colada de lava derramada sobre los flancos del cono o de un domo de lava formado sobre el cráter.

El escenario de afectación de los flujos piroclásticos representa peligros menores, puesto que la gran mayoría de las zonas pobladas se encuentran fuera de su alcance. La mayor consecuencia que tendría este fenómeno es el producir la fusión casi instantánea de grandes sectores del glaciar del Cotopaxi (Andrade, y otros, 2005).

2.4.5 Domos de lava

Cuando el magma tiene una viscosidad alta al punto que no puede fluir al llegar a la superficie se conforman los domos de lava, que se agrupan y enfrían lentamente sobre el cráter o la zona fracturada por donde están saliendo. Debido a la formación de un domo de lava existe una significativa acumulación de rocas calientes en un espacio limitadamente pequeño, por ende este tipo de estructuras son inestables y suelen derrumbarse bajo el efecto de la gravedad, lo cual puede ocasionar un tipo especial de flujo

piroclástico (bloques y ceniza). Este fenómeno es más común en los magmas dacíticos y riolíticos

Durante la actividad volcánica del Cotopaxi I donde la principal característica era la presencia de erupciones de magmas riolíticos, se contó con la formación de domos de la lava. Mientras que en los últimos 4000 años el Coloso se ha caracterizado por erupciones de magmas andesíticos y por ende no ha existido la formación de domos de lava.

En un futuro cercano es poco probable que exista la formación de domos de lava (Andrade, y otros, 2005).

2.4.6 Flujos de lava

Este fenómeno es también conocido como coladas o derrames de lava. La lava es roca fundida (estado líquido) que se emite en una erupción volcánica, es derramada desde el cráter o desde alguna zona fisurada del volcán y fluye por los flancos y quebradas, tiene una temperatura que oscila entre 700° C y 1200° C y para que esta fluya tiene un grado bajo viscosidad.

Los magmas andesíticos o basálticos tienen la capacidad de hacer fluir la lava. Cuando una colada de lava se encuentra en los flancos altos del volcán, su parte frontal puede solidificarse, volverse inestable y derrumbarse bajo la acción de la gravedad, de tal manera que se puede formar un tipo especial de flujo piroclástico conocido como flujo de bloques y ceniza.

En cuando al volcán Cotopaxi, este fenómeno se presentó en los períodos prehistórico e histórico. La repetida acumulación y apilamiento de coladas de lava intercaladas con caídas de escoria y pómez es lo que poco a poco ha construido el cono del Cotopaxi (Andrade, y otros, 2005).

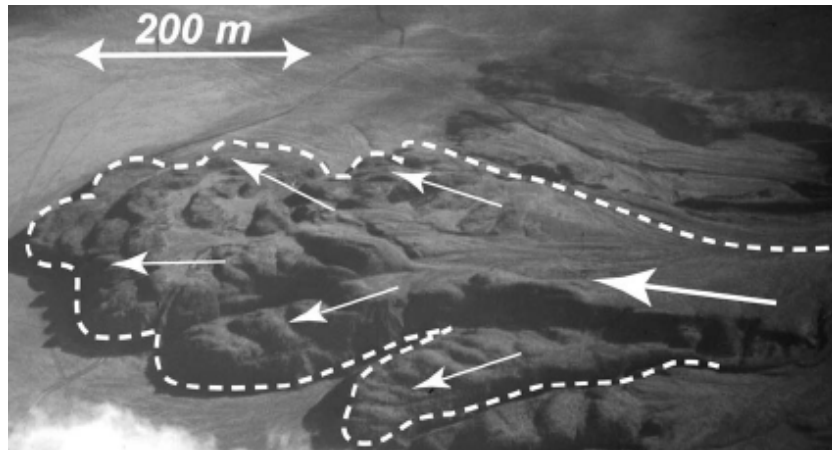


Figura 15. Colada de lava que fluyó por el noreste del volcán Cotopaxi

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

2.4.7 Gases volcánicos

Los gases volcánicos se presentan antes durante y después de una erupción, dichos gases tienen procedencia del magma en proceso de presurización y están conformados principalmente de vapor de agua, no obstante existen cantidades versátiles de gases que pueden resultar peligrosos para los seres vivos, estos son: dióxido de azufre (SO_2), ácido clorhídrico (HCl), dióxido de carbono (CO_2), también se presentan gases tóxicos como: ácido fluorhídrico (HF) y el azufre (S_2); que provocan la contaminación de la flora y fauna.

De este tipo de fenómeno no se habla en la historia eruptiva del volcán Cotopaxi, puesto que sus efectos hacia la población fueron menores en comparación a los otros fenómenos.

En caso de presenciar este tipo de fenómeno, puede provocar irritación en la nariz, ojos y boca de las personas y animales, en cuanto a la fauna se vería altamente afectada por los gases tóxicos, obviamente siempre y cuando mantengan contacto directo con los gases volcánicos (Andrade, y otros, 2005).

2.4.8 Sismos volcánicos

Este tipo de fenómeno se origina por la fracturación de las rocas del conducto volcánico bajo los esfuerzos derivados de la presión del magma ascendente y/o por la circulación de fluidos en las rocas del fluido volcánico. También está caracterizado por un bajo nivel de energía, que por regular los ubica en la categoría de microsismos. Por lo general la mayoría de los volcanes presenta actividad sísmica.

En erupciones pasadas del volcán Cotopaxi si se presentaron sismos volcánicos en las poblaciones aledañas, a pesar de este acontecimiento no hubo daños importantes y este fenómeno sirvió para que los científicos especializados puedan investigar y deducir el proceso del volcán.

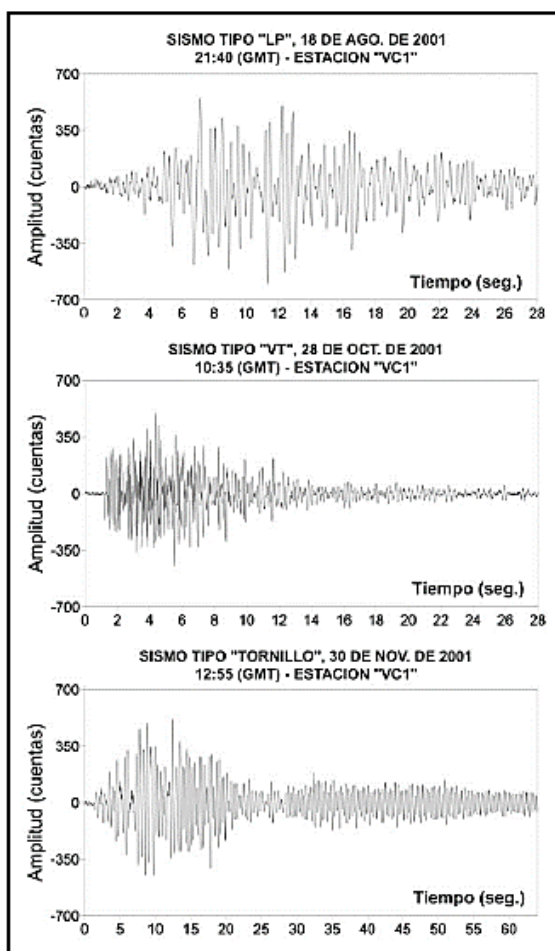


Figura 16. Tipos de sismo volcánicos presentados en el volcán Cotopaxi

Fuente: (Andrade, y otros, 2005)

CAPITULO 3

MARCO TEÓRICO

3.1 Definición de presa

Una de las principales actividades de la ingeniería civil es la construcción de presas, puesto que a lo largo de la historia las civilizaciones han construido obras hidráulicas de contención de manera segura para cubrir los requerimientos necesarios de la sociedad. Cada presa es una estructura única con características independientes tales como su tamaño, tipo, cargas y ubicación. Dichas obras están conformadas por un muro grueso que puede ser de materiales sueltos u hormigón.

En la Figura 18 se puede apreciar las partes de una presa.

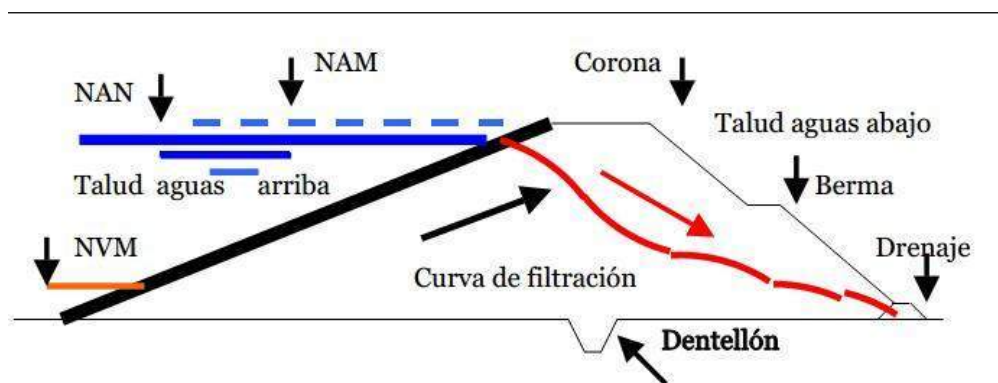


Figura 17. Presa y sus Partes Principales

Fuente: (EcuRed, s.f.)

3.2 Presas según los materiales empleados

Las presas de acuerdo a los materiales utilizados son:

Presas de materiales sueltos

- Presas de tierra
- Presas de enrocado

Presas de hormigón

- Presa de gravedad
- Presa de arco
- Presa de contrafuertes

3.2.1 Presas de materiales sueltos

Las características principales de las presas de relleno son la integración en el terreno y los grandes volúmenes de material empleado, que por lo tanto deben ser fácilmente encontrados. Una presa con material suelto es una solución natural porque es formada por materiales locales y no puede ser pensada independientemente del terreno. Los materiales más utilizados en su construcción son piedras, gravas, arenas, limos y arcillas.

En las presas de relleno se puede emplear una sección homogénea que en la mayoría de los casos se utiliza una zona o un núcleo impermeable que suele ser combinada con espaldones de soporte que pueden ser de un material permeable, de esta manera se está proporcionado estabilidad al material impermeable por lo que se vuelve un propósito estructural.

Las presas de materiales sueltos pueden ser de diferentes tipos, de acuerdo como se utilice los materiales disponibles por ende pueden clasificarse en presas de tierra y enrocado (Novak, Moffat, & Nalluari, 2001).

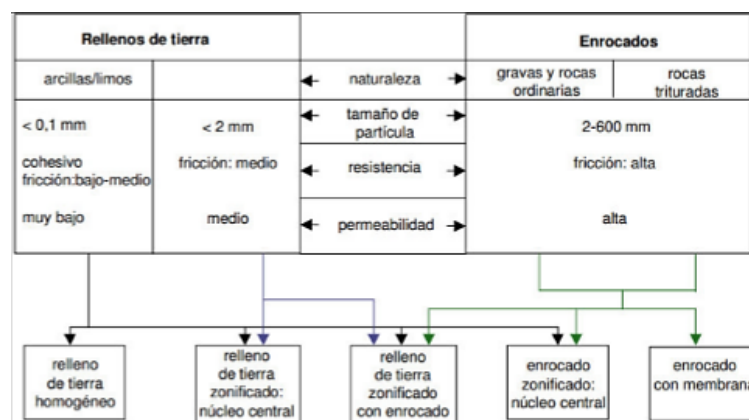


Figura 18. Rellenos de Tierra y Enrocados en la Construcción

Fuente: (Novak, Moffat, & Nalluari, 2001)

Ventajas

- Este tipo de presas pueden ser construidas en todo tipo de sitios, desde valles anchos hasta cañones con laderas de pendientes significativas.
- Una ventaja importante es que en las presas de materiales sueltos se utilizan materiales naturales de la zona y de esta manera disminuye la necesidad de importar y transporta material procesado.
- Las presas de tierra y enrocado se adaptan a un rango extenso de condiciones de cimentación, desde rocas competentes hasta suelos blandos y compresibles.
- Cuando existe un diseño adecuado de las presas de materiales sueltos, estas pueden tener de manera segura un grado de asentamiento-deformación sin sufrir fracturas o fallas.

Desventajas

- Este tipo de presas son vulnerables al sobrevertido, por lo que es necesario asegurar el alivio de las inundaciones mediante un vertedero separado.
- Para las presas de materiales sueltos existen grandes posibilidades de infiltraciones ocultas especialmente en su fundación.

3.2.1.1 Presas de tierra

Las presas de tierra constituyen el tipo de presas más común, principalmente porque en su constitución intervienen materiales en su estado natural excavados u obtenidos de sus alrededores que requieren el mínimo de tratamiento. Además, los requisitos para sus cimentaciones son menos exigentes que para los otros tipos. Los materiales de relleno se colocan y se compactan sin ningún ligante en especial, es probable que las presas de tierra continúen prevaleciendo sobre los demás tipos para fines de almacenamiento, parcialmente, debido a que el número de emplazamientos favorables para las

estructuras de concreto está disminuyendo como resultado de los numerosos sistemas de almacenamiento de agua que se han emprendido.

Para que la presa sea considerada de tierra debe contener suelos compactados que representen el 50% del volumen colocado del material. Las presas de tierra requieren estructuras complementarias que sirvan de demasías. La principal desventaja de una presa de tierra es que, si no tienen suficiente capacidad, el vertedor de demasías puede dañarse y aun destruirse por el efecto erosivo del agua que llegue a rebasarla (Anónimo, 1966).

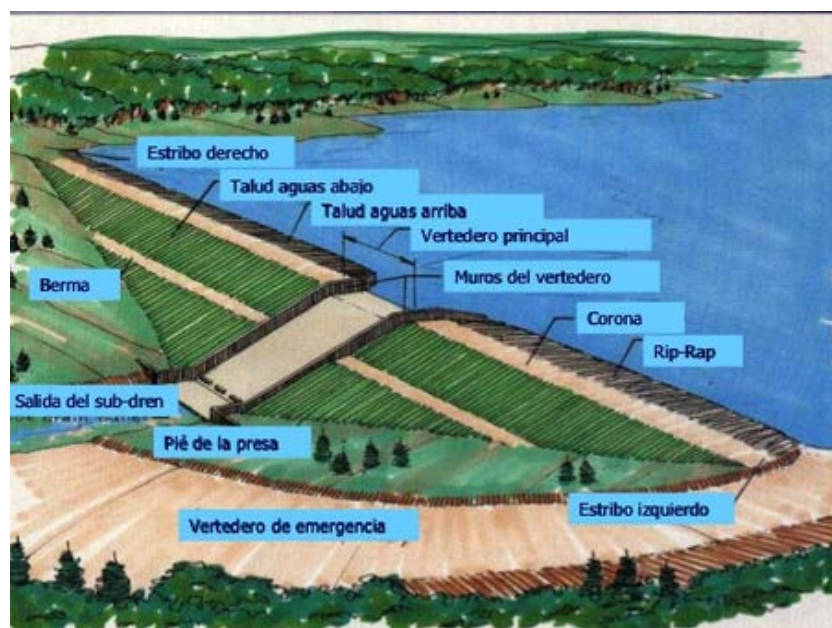


Figura 19. Presa de Tierra

Fuente: (Suarez Diaz, 2012)

Las presas de tierra se las puede clasificar de la siguiente manera:

- Presas del tipo de diafragma.
- Presas de material homogéneo.
- Presas de tierra de sección compuesta.

Presas del tipo de diafragma

Este tipo de presas se construye el cuerpo del terraplén de materiales permeables tales como arena y grava y un diafragma delgado de material impermeable para que de esta manera sirva como una barrera hidráulica. El diafragma puede ser de tierra, concreto de cemento portland, concreto bituminoso, entre otros (Anónimo, 1966).

Presas de material homogéneo

Este tipo de presas están compuestas de un solo material (excluyendo la protección de los paramentos) el material utilizado en la presa debe ser suficientemente impermeable para que de esta manera se forme una barrera efectiva para el agua y estabilidad en los taludes (Anónimo, 1966).

Presas de tierra de sección compuesta

Este tipo de presas cuentan con un núcleo central impermeable confinado por zonas de materiales considerablemente permeables. Estas zonas confinan, soportan y protegen el núcleo impermeable (Anónimo, 1966).

3.2.1.2 Presas de enrocado

Este tipo de presas tienen dos componentes estructurales básicos: una membrana impermeable y un terraplén que soporta a la membrana. El dique generalmente consiste en una sección aguas arriba de piedra seca, hormigón, entre otros y una sección aguas abajo de enrocado suelto.

La sección de las presas de enrocado incluye un elemento impermeable discreto de relleno de tierra compactada, concreto esbelto o una membrana bituminosa. La denominación como presa de enrocado es apropiada cuando

más del 50% del material de relleno se pueda clasificar como roca, es decir, material resistente a la fricción de granulometría gruesa.

Las presas de enrocado son adecuadas en presas de gran altura y en lugares donde se pueda obtener una buena roca. En la práctica moderna se debe tener un enrocado bien graduado, de alta compactación en capas delgadas mediante un equipo pesado (Novak, Moffat, & Nalluari, 2001).



Figura 20. Presa de Enrocado Kleine Kinzig

Fuente: (Presas y Estructuras de Retención, s.f.)

3.2.2 Presas de gaviones

Las presas de gaviones son estructuras permanentes, flexibles y permeables que se utilizan para la regularización de corrientes, este tipo de presas son construidas a base de prismas rectangulares de alambre galvanizado denominados gaviones, los cuales deben ser rellenos de piedra con el objeto de formar el cuerpo de la obra que constituye la presa de control. Las mallas de alambre que forman el gavión presentan la forma de un hexágono entrelazado.

Las presas de gaviones tienen mayor resistencia al deslizamiento y al volteo (SAGARPA, s.f.).



Figura 21. Presa de Gaviones

Fuente: (Praga, 2008)

3.2.3 Presas de hormigón

Las presas de hormigón están formadas por una mezcla de cemento, arena y ripio, estas estructuras se deben caracterizar por su durabilidad, impermeabilidad y economía. Este tipo de presas con frecuencia son empleadas en los países desarrollados, debido a que con el material empleado se puede construir estructuras más estables y duraderas (Novak, Moffat, & Nalluari, 2001).

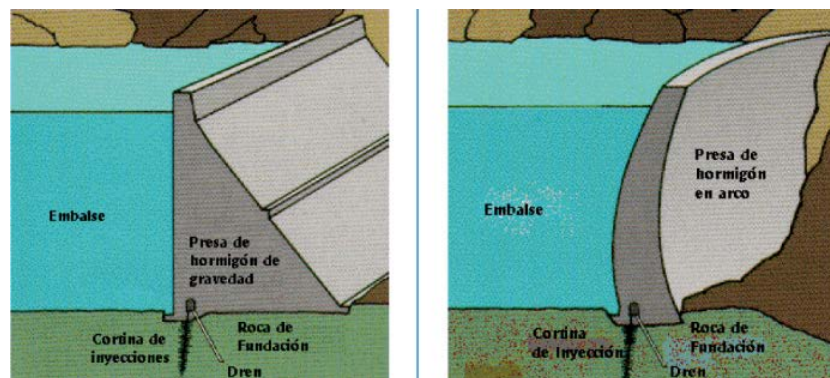


Figura 22. Presas de hormigón

Fuente: (Navarro, 2014)

3.2.3.1 Presa de gravedad

Es aquella presa que su propio peso resiste el empuje del agua, por ende debe ser lo suficientemente estable. Constituyen las estructuras de mayor durabilidad y requieren menor mantenimiento (Novak, Moffat, & Nalluari, 2001).

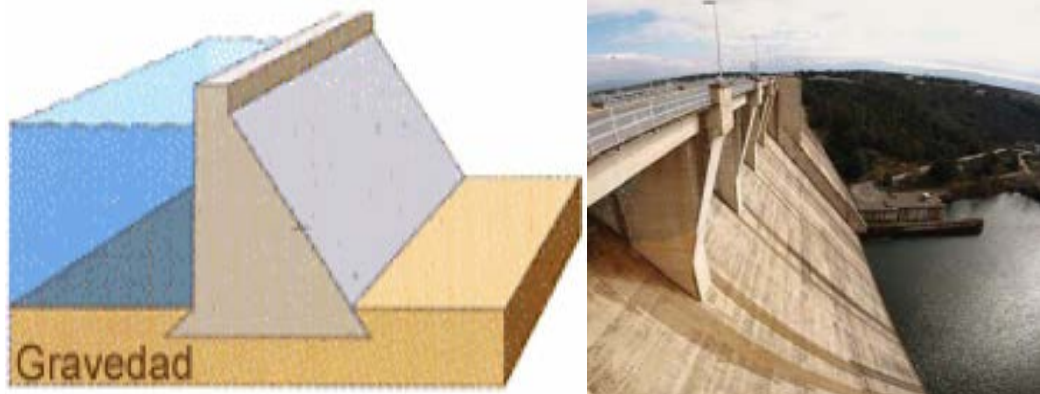


Figura 23. Presa de gravedad

Fuente: (Presas de hormigón, 2013)

3.2.3.2 Presa de arco

Este tipo de estructuras tienen una significativa curvatura aguas arriba, trabajan como un arco horizontal y transmiten la mayor parte de la carga a los estribos. Estructuralmente son más eficientes que las presas de gravedad o contrafuertes (Novak, Moffat, & Nalluari, 2001).

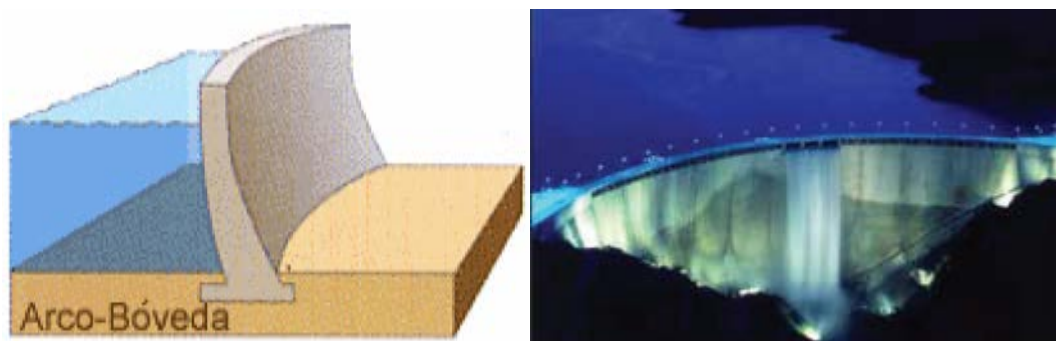


Figura 24. Presa de arco

Fuente: (Presas de hormigón, 2013)

3.2.3.3 Presa de contrafuertes

Están formadas por un paramento continuo aguas arriba soportando a intervalos regulares por un contrafuerte aguas abajo (Presas de hormigón, 2013).

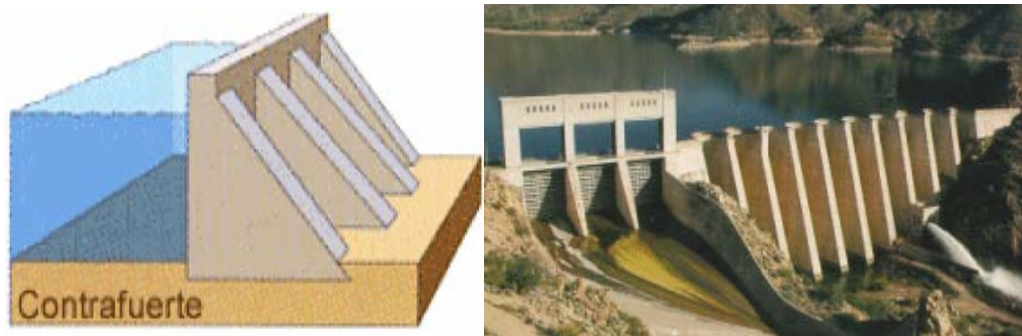


Figura 25. Presa de contrafuertes

Fuente: (Presas de hormigón, 2013)

3.3 Otras obras de contención de lahares

3.3.1 Sistemas flexibles de membranas de acero

Los sistemas flexibles de membranas de acero han sido utilizados en la protección contra desprendimientos de rocas y en estabilización de taludes. Hoy en día, esta tecnología se ha adecuando a diferentes hidrotecnias como una opción a las estructuras rígidas de defensa contra torrentes y corrientes, y en general, como defensa frente a flujos de detritus e incluso contra lavas torrenciales.

El flujo de detritus se forma a partir de una combinación de fenómenos naturales que son el resultado de inundaciones o de ocurrencia de fenómenos meteorológicos con periodos de retorno muy altos. Radica, básicamente en el arrastre por un torrente de agua de materiales sueltos, granulares y tierra o lodo, restos de vegetación y en ocasiones troncos de árboles, a través de los cauces naturales del terreno. Al igual que los desprendimientos de rocas el

flujo de detritus actúa de forma dinámica. (Barreras flexibles de redes de anillos para la protección contra flujos de detritus, 2008).

El funcionamiento de las barreras flexibles de redes de anillos consiste en que el flujo de llegada del detritus queda fraccionado por la estructura de la red de anillos de modo que las partículas gruesas quedan retenidas mientras que el agua y el material fino pasan a través de ella. Los sistemas geobrugg UX/VX de protección contra flujos de detritus están basados en las barreras de protección contra desprendimientos. Este tipo de mallas se encuentran conformados de la siguiente manera:

- Cables de soporte de mayor dimensión.
- Frenos con mayor capacidad de absorción de energía.
- Anclajes de mayor capacidad resistente.
- Protección contra la abrasión.
- Ajuste a diferentes geometrías de cauce.



Figura 26. Barrera Flexible a Base de Redes de Anillos

Fuente: (Barreras flexibles de redes de anillos para la protección contra flujos de detritus, 2008)

3.3.1.1 Presa SABO

En Japón esta tecnología se ha desarrollado considerablemente y se denomina ingeniería SABO. El término SABO es japonés y significa control de erosión y sedimentos. La construcción de presas SABO se han llevado a cabo durante los últimos 200 años (Mizuyama, 2008).

En la actualidad las presas SABO no sólo protegen contra la erosión de la superficie y el transporte de sedimentos en ríos, sino también contra deslizamientos de tierra profundos y avalanchas de nieve. SABO funciona también contra muchos peligros volcánicos, entre ellos:

- Lahares
- Flujos de lava
- Flujos piroclásticos

Presas SABO de hormigón

Este tipo de presa SABO es cerrado, detiene y drena el agua del flujo de escombros. Se usa como estructura extremo aguas arriba (Mizuyama, 2008).



Figura 27. Presa SABO de hormigón

Fuente: (Mizuyama, 2008)

Presas SABO de tubos de acero

Las presas SABO de tubos de acero son de tipo abierto, estas grandes estructuras atrapan grandes rocas del flujo de escombros se las han construido desde marzo de 2007, han sido muy aceptadas en la sociedad debido a que no cambian la condición natural de los torrentes y también por su bajo costo de mantenimiento.

Existen también presas SABO de tubos de acero que se usan como estructura extremo aguas abajo del torrente de arrastre. Su apertura es pequeña, casi igual al diámetro de las rocas transportadas en la parte delantera del flujo de escombros (Mizuyama, 2008).



Figura 28. Presas SABO de tubos de acero

Fuente: (Mizuyama, 2008)

Presas SABO de concreto con hendidura

En este tipo de presas las barras de acero se han instalado en la ranura, la rendija actúa como drenaje quitándole el agua al flujo y el muro detiene las rocas (Mizuyama, 2008).



Figura 29. Presa SABO de concreto con hendidura

Fuente: (Mizuyama, 2008)

Presas mixtas

Sandoval (2016), describe que las presas mixtas son estructuras formadas por la combinación de materiales, por lo general hormigón y tierra, que van desde una altura de 30 a 80 metros. Una presa mixta se encuentra construida en Almaty un lugar de Kazajistán para el control de flujo de lodos, esta presa se la ubica en el cauce natural del río por lo que también se diseñan obras de conducción y control del flujo.



Figura 30. Presa mixta

Fuente: (Sandoval W. , Obras de mitigación del flujo de lahares del Cotopaxi, 2016)

CAPITULO 4

TOPOGRAFÍA, HIDROLOGÍA Y SUELOS

4.1 Descripción del estudio

Los lahares del volcán Cotopaxi han sido fenómenos destructivos que han transitado por los drenajes naturales y de esta manera se han convertido en el evento de mayor riesgo para los habitantes de la zona de Latacunga, el Valle de Los Chillos y la Cuenca media del Río Napo.

4.1.1 Recorrido de los lahares en la cuenca norte

Según Aguilera & Toulkeridis (2004-2005), la cuenca norte empieza con los ríos Pita y El Salto que drenan la parte nor-oriental y norte del volcán Cotopaxi, estos ríos se juntan a 14 Km y recorren entre los volcanes Sincholagua, Rumiñahui y Pasochoa. Una parte del volumen de los lahares que transita por el río Pita desborda al río Santa Clara debido a una característica particular que existe en la forma de La Caldera, de tal manera que circula hasta el Valle de Los Chillos aumentando significativamente el riesgo.

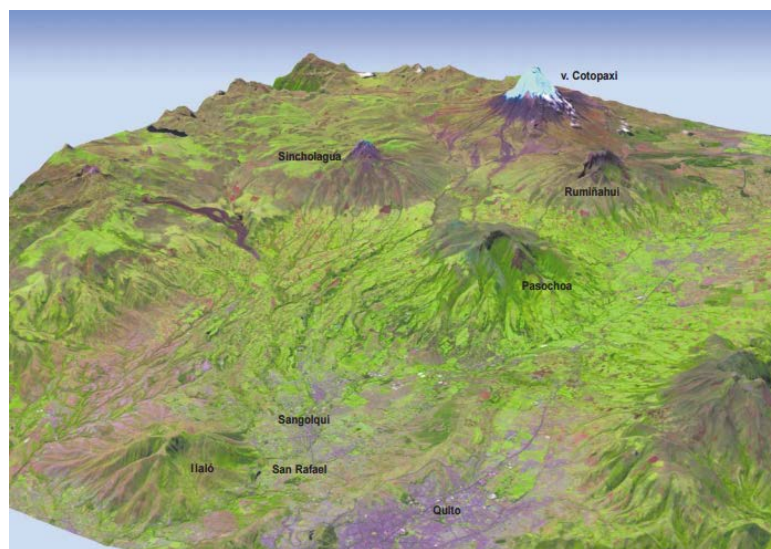


Figura 31. Morfología de la cuenca norte del volcán Cotopaxi

Fuente: (Aguilera & Toulkeridis, 2004-2005)

4.2 Condiciones climáticas

Las áreas de estudio debido a sus ubicaciones geográficas se encuentran en una zona que corresponde al clima ecuatorial frío de alta montaña que se sitúa siempre por encima de los 3.000 msnm; con temperaturas entre los 6° - 12°C y precipitaciones promedio de 1000 a 2000 mm por año, la mayoría de los aguaceros son de larga duración pero de baja intensidad. La humedad relativa es siempre superior al 80%. La vegetación natural, conocida como matorral en el piso más bajo, es reemplazada en el piso inmediatamente superior por un espeso tapiz herbáceo frecuentemente saturado de agua conocido como páramo (Ministerio del Ambiente, 2010).

4.3 Topografía

4.3.1 Reconocimiento del terreno

Realizamos las respectivas visitas técnicas a los lugares donde se tiene previsto realizar las implantaciones de las presas mixtas, para lo cual recorrimos a pie los sectores de los ríos El Salto como se muestra en la Figura 31, y Pita como se puede observar en la Figura 32, a lo largo del cauce de cada uno, en donde pudimos corroborar los lugares críticos debido al flujo de lodo y escombros en caso de producirse una erupción del Coloso.

El recorrido se realizó con el apoyo del Ing. Oswaldo Padilla, que es el encargado de la topografía del lugar por medio de la Secretaria de Gestión y Riesgos.

Una vez realizado el reconocimiento de cada sector, se nos proporcionó las ortofotos correspondientes a cada lugar de estudio.



Figura 32. Lugar implantación de la presa mixta para el Río El Salto



Figura 33. Lugar implantación de la presa mixta para el Río Pita

4.3.2 Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos utilizamos las ortofotos en las que todos los elementos presentan la misma escala, libre de errores y deformaciones. Por medio del programa Arcgis obtuvimos las curvas de nivel junto con la cartografía digitalizada del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:5000.

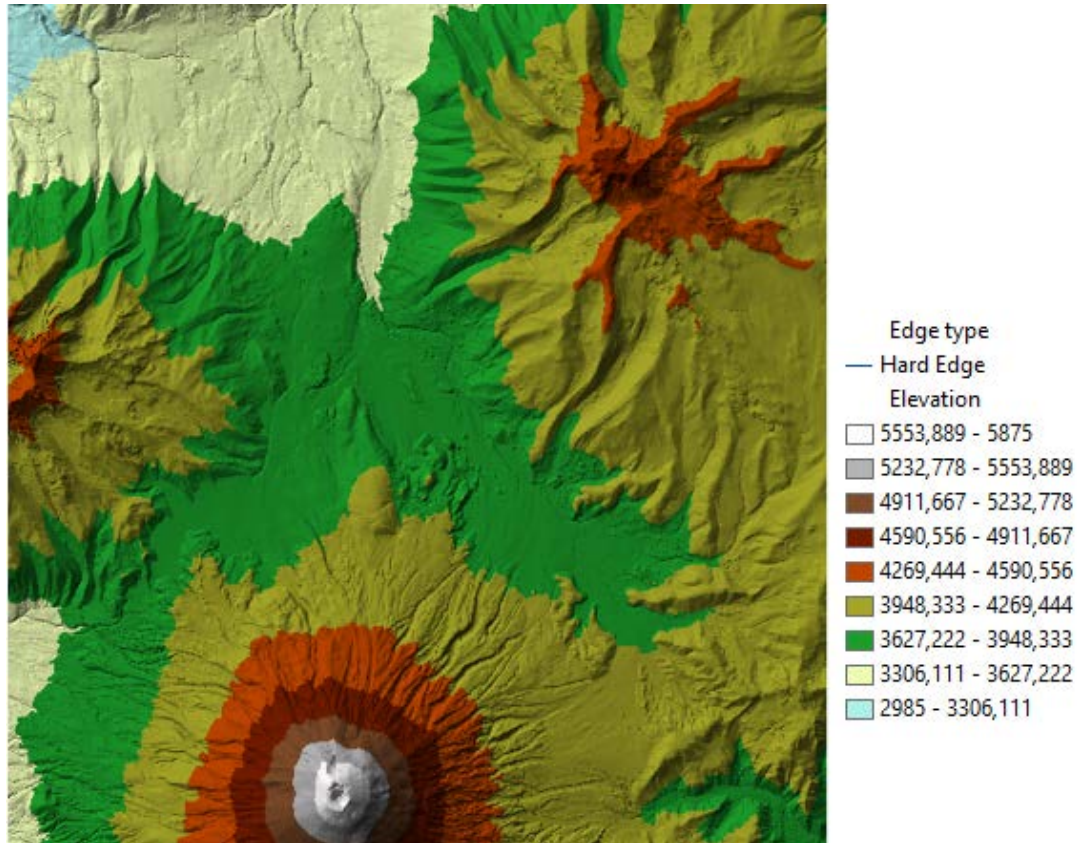


Figura 34. Topografía del sector norte del volcán Cotopaxi

4.4 Ubicación geográfica del proyecto

Los causes de drenaje del flanco norte por donde han transitado los lahares primarios generados por erupciones pasadas del volcán Cotopaxi han sido específicamente los ríos El Salto y Pita.

Para la parte encañonada del río El Salto se ha ubicado el punto 1 con las coordenadas: 784985E, 9945787N.

El río Pita nace en los páramos septentrionales del volcán Cotopaxi, tiene un curso de sureste a noroeste. Para este río se ha localizado el punto 3 con las coordenadas: 786143E, 9940064N.



Figura 35. Ubicación geográfica del proyecto

Fuente: (Google Earth Pro, 2016)

4.5 Bases de diseño

4.5.1 Área y volumen del glaciar del volcán Cotopaxi

Hace varios años se ha evidenciado la disminución de los glaciares en varias zonas del mundo, debido a factores ambientales, como el calentamiento de la tierra por el efecto invernadero y el agujero en la capa de ozono.

En estas últimas décadas el glaciar del volcán Cotopaxi se ha vuelto más joven, esto se debe a los procesos eruptivos que poco a poco han ido destruyendo los glaciares, de manera que cada vez que se presente una erupción la nieve del Coloso se renueva.

El casquete glaciar del volcán Cotopaxi está dividido en 19 partes como un pastel o lenguas y cada una representa a una cuenca hidrográfica o tiene

una relación a una quebrada o río. Las 19 partes conforman las tres sub-redes principales (Norte, Sur y Oriental) (Lagla, 2015).

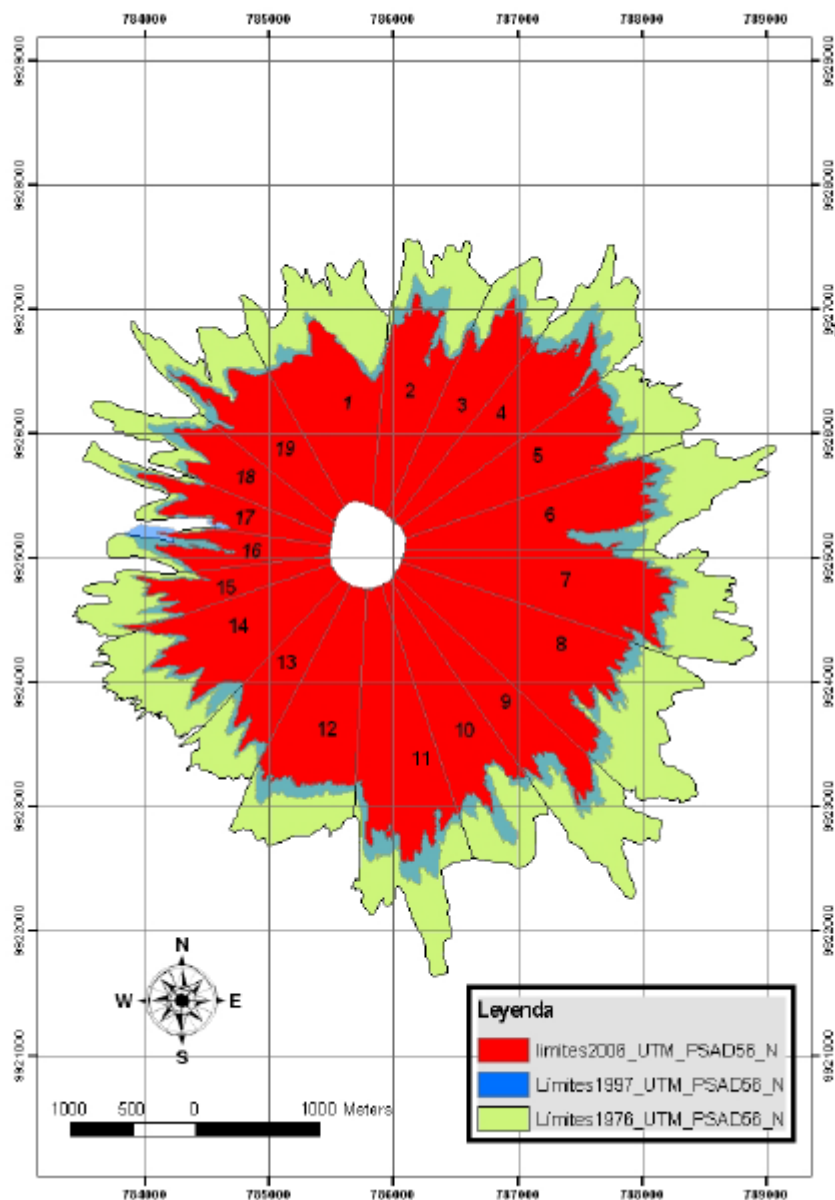


Figura 36. Comparación de las coberturas glaciares 1976-2006 para el volcán Cotopaxi

Fuente: (Cáceres, 2010)

La interpretación de las lenguas ha servido para el cálculo del área del glaciar de los años enlistados en la siguiente tabla.

Tabla 2**Área total del casquete glaciar en diferentes períodos**

| Año | Área (km ²) |
|------|-------------------------|
| 1976 | 21,80 |
| 1997 | 15,43 |
| 2006 | 11,84 |
| 2011 | 11,63 |

Fuente: (Lagla, 2015)

Según Lagla (2015), para el proceso eruptivo que empezó el 14 de Agosto del 2015, el casquete glaciar ha experimentado una reducción acumulada del 54.85% con respecto al año 1976.

Tabla 3**Área y volumen del casquete glaciar hasta Agosto del 2015**

| Área total (Km ²) | Volumen total (Km ³) | Volumen total (Hm ³) |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 11,56 | 0,35 | 350 |

Fuente: (Lagla, 2015)

4.5.1.1 Área y volumen del glaciar para la cuenca norte

En base a los estudios realizados por Cáceres (2010), para la estimación del área y el volumen del casquete glaciar, se realizaron los cálculos correspondientes para las áreas y los volúmenes que aportan a las cuencas de los ríos El Salto y Pita.

Debido a las condiciones naturales, topográficas y el proceso eruptivo que ha tenido el volcán Cotopaxi en los períodos pre-histórico e histórico, se asemeja con un evento sucedido en el nevado del Ruiz en Colombia. La erupción del coloso colombiano ocurrió el 13 de Noviembre de 1985 y provocó la muerte de 22000 personas de la ciudad de Armero y 1000 personas en Chinchiná. El aporte del glaciar fue del 10%-15% y esto generó lahares (Jumbo, 2015).

Con los estudios anteriormente mencionados, tomando en cuenta lo sucedido con el nevado del Ruiz y considerando un factor de seguridad, para el caso de existir una futura erupción del volcán Cotopaxi expertos como Aguilera y Toulkeridis (2004-2005), estiman que el aporte del casquete glaciar puede ser del 25%.

4.5.1.1.1 Área y volumen del glaciar para la cuenca hidrográfica del río El Salto

Tabla 4

Área y volumen del casquete glaciar para la cuenca hidrográfica del río El Salto

| Área (Km ²) | Volumen (Km ³) | Volumen (Hm ³) | 25% Volumen (Hm ³) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 0,43 | 0,013 | 12,93 | 3,23 |

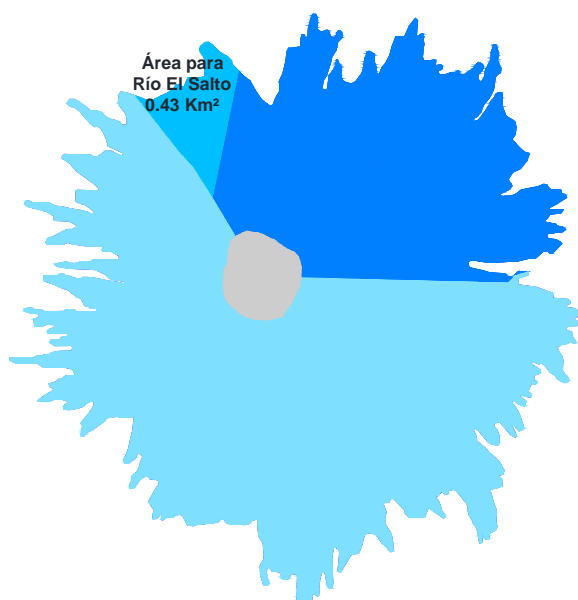


Figura 37. Área de aporte para la cuenca hidrográfica del río El Salto

4.5.1.1.2 Área y volumen del glaciar para la cuenca hidrográfica del río Pita

Tabla 5

Área y volumen del casquete glaciar para la cuenca hidrográfica del río Pita

| Área (Km ²) | Volumen (Km ³) | Volumen (Hm ³) | 25% Volumen (Hm ³) |
|-------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| 3,80 | 0,115 | 115,12 | 28,78 |

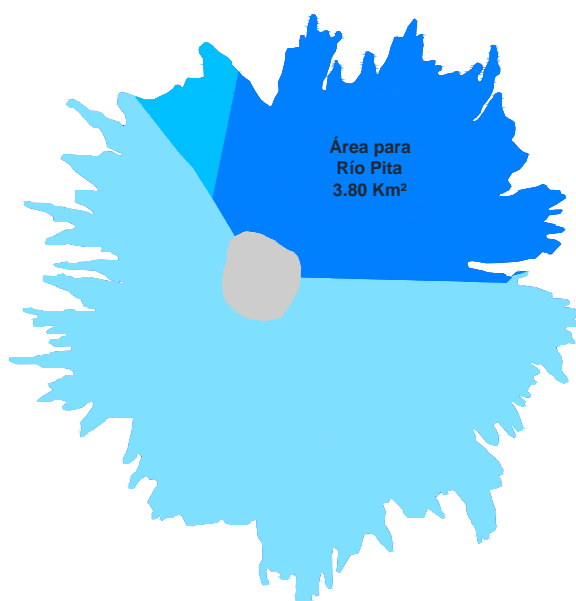


Figura 38. Área de aporte para la cuenca hidrográfica del río Pita

4.5.2 Volumen de embalse

4.5.2.1 Curva característica del embalse

Mediante la curva característica del embalse se define la superficie y el volumen del mismo en función de la cota del nivel de agua. Los datos de las áreas entre curvas de nivel fueron obtenidos del plano topográfico en AutoCAD y mediante las siguientes ecuaciones se calcula el volumen de embalse.

$$\Delta \text{Volumen Embalse} = \frac{\text{Area}_1 + \text{Area}_2}{2} \times \text{Diferencia de Cotas}$$

$$\text{Volumen de Embalse} = \Delta V_1 + \Delta V_2$$

Realizamos un análisis exhaustivo de la topografía y escogimos seis puntos críticos. Los puntos 1,5 y 6 fueron considerados para el río El Salto y los puntos 2,3 y 4 para el río Pita. En la Figura 38 se puede apreciar la ubicación de los puntos anteriormente mencionados.

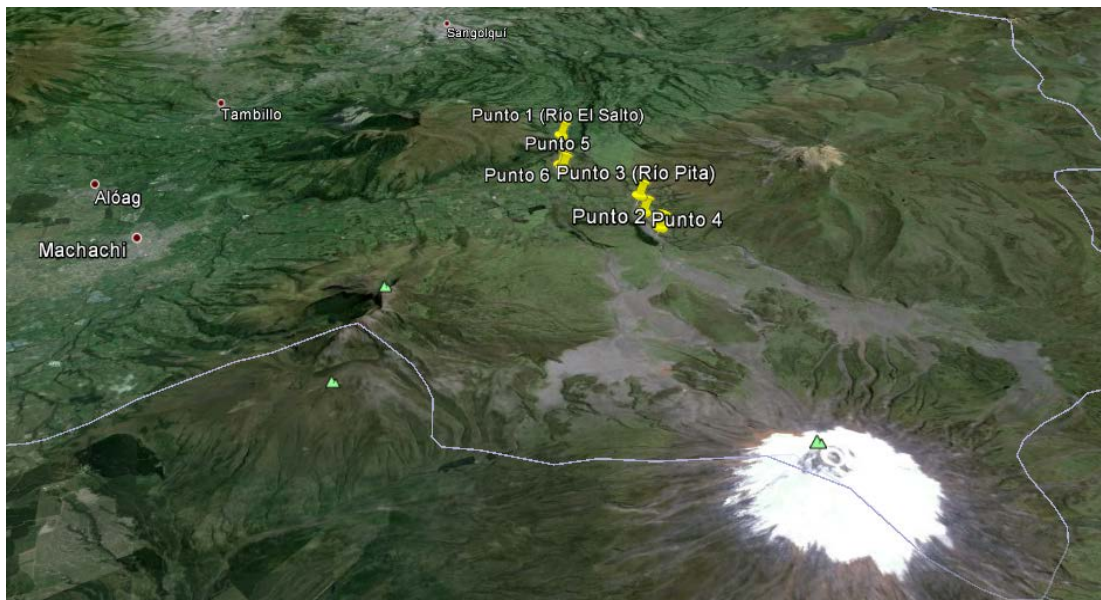


Figura 39. Ubicación de los seis puntos de estudio

Fuente: (Google Earth Pro, 2016)

Finalmente los puntos escogidos fueron el punto 1 para el río El Salto y el punto 3 para el río Pita, ya que estos cumplieron con las condiciones de embalse requeridas de acuerdo al volumen del casquete glaciar que se debe captar en caso de existir una futura erupción y con la relación de volumen de presa y volumen de embalse.

Los demás puntos que sirvieron para el análisis se encuentran incorporados en el anexo 1.

Tabla 6**Volumen de embalse de los seis puntos de estudio para los ríos El Salto y Pita**

| Altura presa (m) | Volumen de embalse (Hm ³) | | | | | |
|------------------|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | Punto 1 | Punto 2 | Punto 3 | Punto 4 | Punto 5 | Punto 6 |
| 55 | 3,89 | | | | | |
| 65 | | 21,89 | | | | |
| 50 | | | 35,62 | | | |
| 55 | | | | 33,08 | | |
| 60 | | | | | 3,81 | |
| 55 | | | | | | 3,10 |

4.5.2.1.1 Punto 1 (Río El Salto)

En la Figura 39, se puede apreciar la zona de cierre para la implantación de la obra de protección en el río El Salto.

En la Figura 40, se realiza la curva característica del embalse para el río El Salto en donde se relaciona el volumen de embalse en hectómetros cúbicos y la cota del nivel del agua en metros sobre nivel del mar, a partir del punto de control y la cuenca generada en base al punto de cierre.

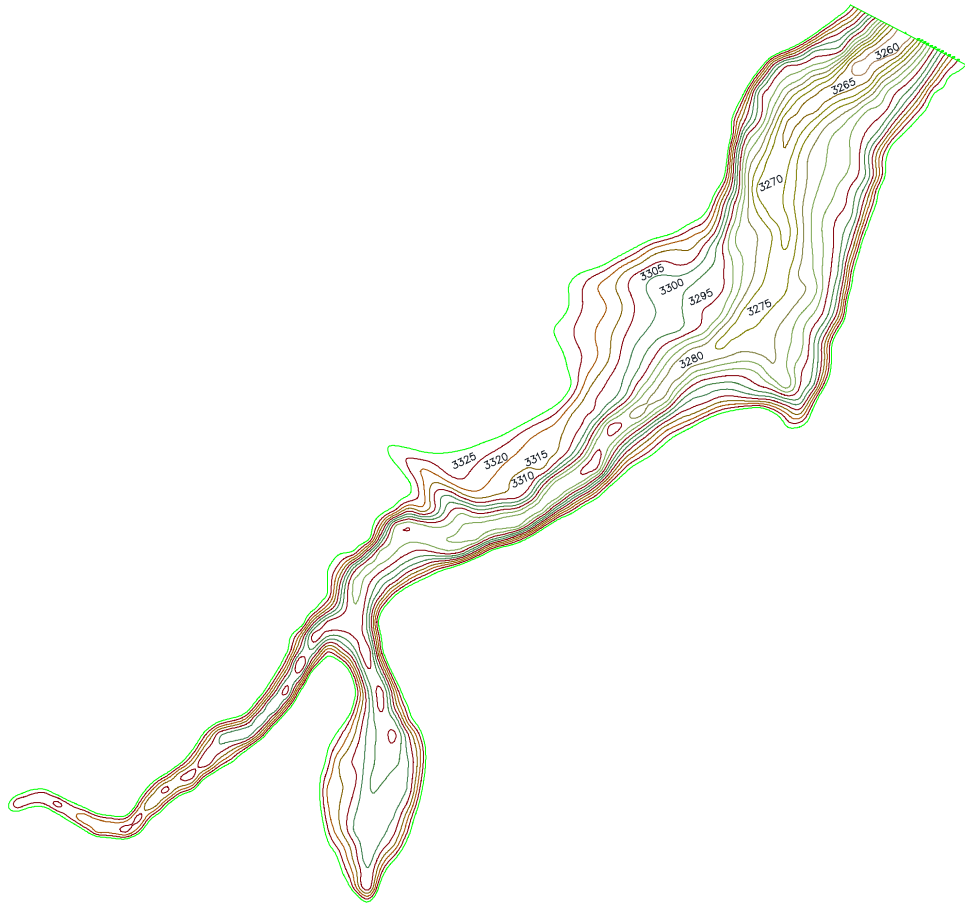


Figura 40. Punto de cierre para el punto 1 (Río El Salto)

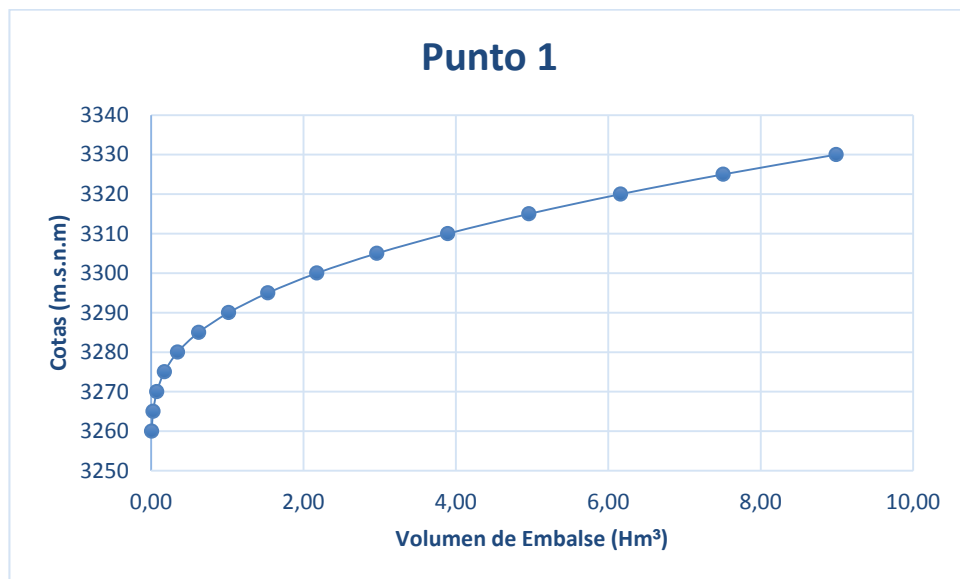


Figura 41. Curva característica del embalse para el punto 1 (Río El Salto)

En la cota 3310 se cumple con las condiciones de embalse, ya que en este caso se debería captar 3.23 Hm³

Tabla 7

Curva característica del embalse para el Río El Salto

| Cota (m.s.n.m) | Área (m ²) | (A ₁ +A ₂)/2 (m ²) | Diferencia de Cotas (m) | Δ Volumen Embalse (m ³) | Volumen de Embalse (m ³) | Volumen de Embalse (Hm ³) | Altura presa (m) |
|----------------|------------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 3260 | 1682,70 | | 5 | 8413,48 | 8413,48 | 0,01 | 5 |
| 3265 | 5802,40 | 3742,55 | 5 | 18712,73 | 27126,21 | 0,03 | 10 |
| 3270 | 13848,32 | 9825,36 | 5 | 49126,79 | 76253,00 | 0,08 | 15 |
| 3275 | 25744,29 | 19796,30 | 5 | 98981,52 | 175234,52 | 0,18 | 20 |
| 3280 | 43704,79 | 34724,54 | 5 | 173622,69 | 348857,20 | 0,35 | 25 |
| 3285 | 66792,29 | 55248,54 | 5 | 276242,69 | 625099,89 | 0,63 | 30 |
| 3290 | 90813,02 | 78802,65 | 5 | 394013,26 | 1019113,15 | 1,02 | 35 |
| 3295 | 115155,98 | 102984,50 | 5 | 514922,50 | 1534035,65 | 1,53 | 40 |
| 3300 | 141636,04 | 128396,01 | 5 | 641980,07 | 2176015,72 | 2,18 | 45 |
| 3305 | 173004,44 | 157320,24 | 5 | 786601,20 | 2962616,92 | 2,96 | 50 |
| 3310 | 199621,69 | 186313,07 | 5 | 931565,33 | 3894182,25 | 3,89 | 55 |
| 3315 | 226302,56 | 212962,12 | 5 | 1064810,62 | 4958992,88 | 4,96 | 60 |
| 3320 | 255085,32 | 240693,94 | 5 | 1203469,68 | 6162462,56 | 6,16 | 65 |
| 3325 | 283066,70 | 269076,01 | 5 | 1345380,04 | 7507842,60 | 7,51 | 70 |
| 3330 | 310460,29 | 296763,49 | 5 | 1483817,47 | 8991660,07 | 8,99 | 75 |

4.5.2.1.2 Punto 3 (Río Pita)

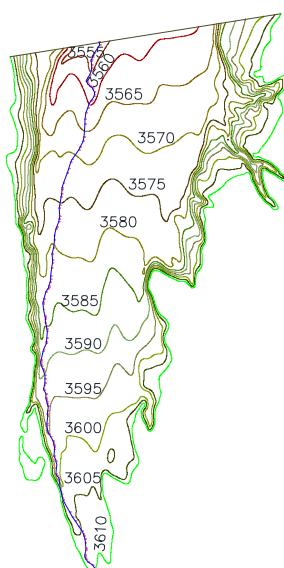


Figura 42. Punto de cierre para el punto 3 (Río Pita)

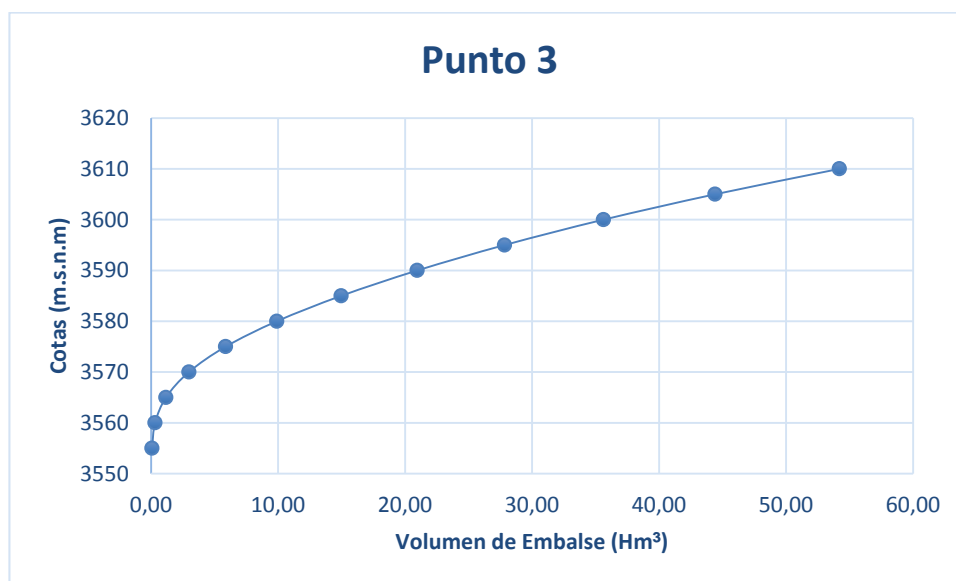


Figura 43. Curva característica del embalse para el punto 3 (Río Pita)

Para el análisis de la zona por donde fluye el río Pita, en la cota 3600 se cumple con el volumen de embalse puesto que se debe captar 28.78 Hm³.

Tabla 8

Curva característica del embalse el Río Pita

| Cota (m.s.n.m) | Área (m ²) | (A ₁ +A ₂)/2 (m ²) | Diferencia de Cotas (m) | Δ Volumen Embalse (m ³) | Volumen de Embalse (m ³) | Volumen de Embalse (Hm ³) | Altura presa (m) |
|----------------|------------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 3555 | 14337,06 | | 5 | 71685,30 | 71685,30 | 0,07 | 5 |
| 3560 | 83278,04 | 48807,55 | 5 | 244037,74 | 315723,04 | 0,32 | 10 |
| 3565 | 260787,96 | 172033,00 | 5 | 860164,98 | 1175888,02 | 1,18 | 15 |
| 3570 | 460861,07 | 360824,51 | 5 | 1804122,57 | 2980010,59 | 2,98 | 20 |
| 3575 | 695749,50 | 578305,29 | 5 | 2891526,43 | 5871537,02 | 5,87 | 25 |
| 3580 | 916450,62 | 806100,06 | 5 | 4030500,30 | 9902037,32 | 9,90 | 30 |
| 3585 | 1110048,50 | 1013249,56 | 5 | 5066247,81 | 14968285,12 | 14,97 | 35 |
| 3590 | 1287157,94 | 1198603,22 | 5 | 5993016,12 | 20961301,24 | 20,96 | 40 |
| 3595 | 1460798,99 | 1373978,47 | 5 | 6869892,33 | 27831193,56 | 27,83 | 45 |
| 3600 | 1654621,40 | 1557710,19 | 5 | 7788550,96 | 35619744,52 | 35,62 | 50 |
| 3605 | 1862140,62 | 1758381,01 | 5 | 8791905,05 | 44411649,57 | 44,41 | 55 |
| 3610 | 2051831,79 | 1956986,21 | 5 | 9784931,03 | 54196580,60 | 54,20 | 60 |

4.5.3 Volumen de presa

Las áreas de corte para el análisis del volumen de la presa fueron obtenidas de los perfiles transversales en AutoCAD.

Tabla 9

Volumen de la presa para los seis puntos de estudio para los ríos El Salto y Pita

| Volumen de la presa (Hm ³) | | | | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Altura presa (m) | Punto 1 | Punto 2 | Punto 3 | Punto 4 | Punto 5 | Punto 6 |
| 55 | 0,18 | | | | | |
| 65 | | 1,98 | | | | |
| 50 | | | 1,75 | | | |
| 55 | | | | 1,70 | | |
| 60 | | | | | 0,48 | |
| 55 | | | | | | 0,61 |

4.5.3.1 Punto 1 (Río El Salto)

Tabla 10

Volumen de la presa para el río El Salto

| H (m) | Área (m ²) | Área corte (m ²) | b (m) | Volumen (m ³) |
|-------|------------------------|------------------------------|-------|---------------------------|
| 55 | 2566,67 | 3852,87 | 70,05 | 179800,41 |

$$\frac{\text{Volumen de presa}}{\text{Volumen de embalse}} = \frac{0.18}{3.89} = 0.046$$

El punto 1 para el río El Salto fue elegido debido a que se utiliza menos hormigón y se capta el volumen necesario del flujo de lahares.

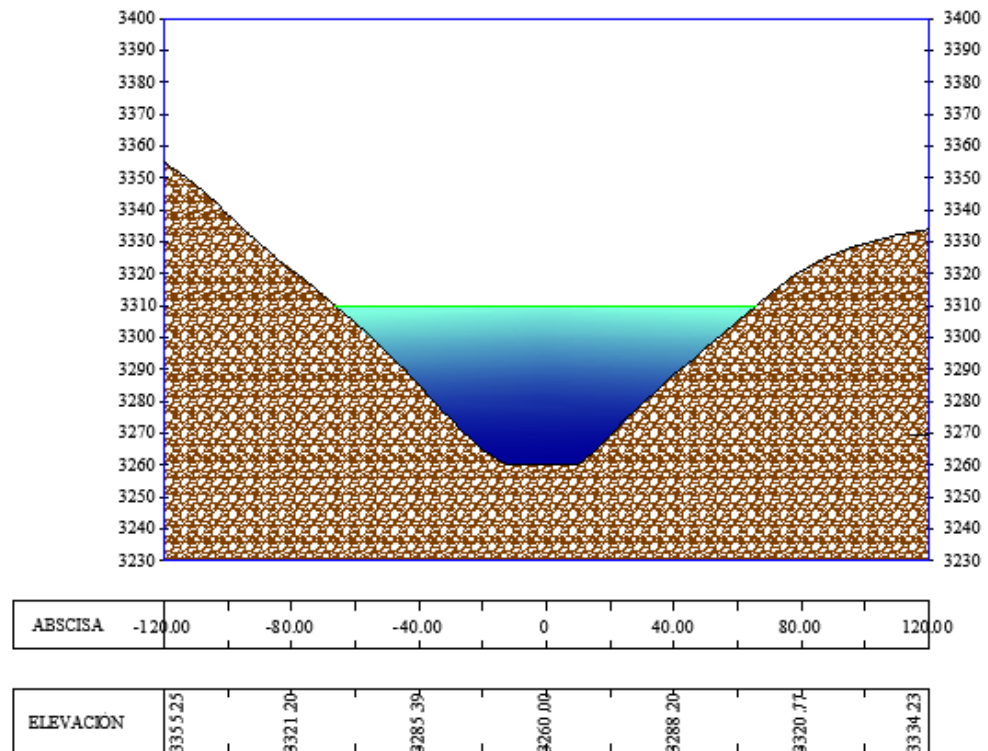


Figura 44. Perfil transversal - Área de corte para el punto 1 (Río El Salto)

4.5.3.2 Punto 3 (Río Pita)

Tabla 11

Volumen de la presa para el río Pita

| H (m) | Área (m ²) | Área corte (m ²) | b (m) | Volumen (m ³) |
|-------|------------------------|------------------------------|--------|---------------------------|
| 50 | 2166,67 | 40293,77 | 805,88 | 1746063,32 |

$$\frac{\text{Volumen de presa}}{\text{Volumen de embalse}} = \frac{1.75}{35.62} = 0.049$$

En cuanto al punto 3 para el río Pita, este fue seleccionado debido a que se utiliza menos volumen de hormigón y la presa captaría los lahares producidos en una futura erupción del volcán Cotopaxi.

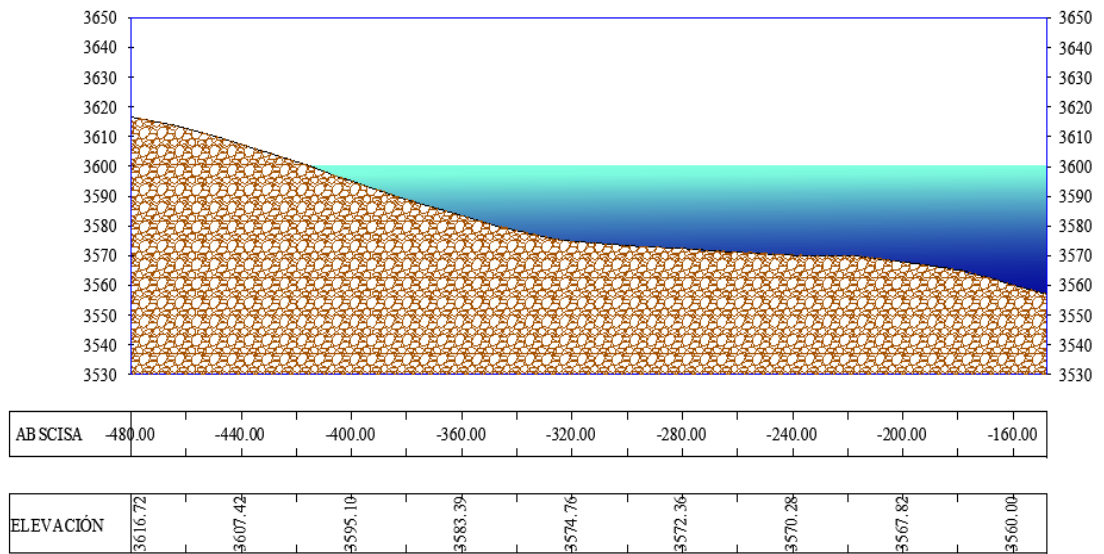


Figura 45. Perfil Transversal (Abscisa -480 a -160) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita)

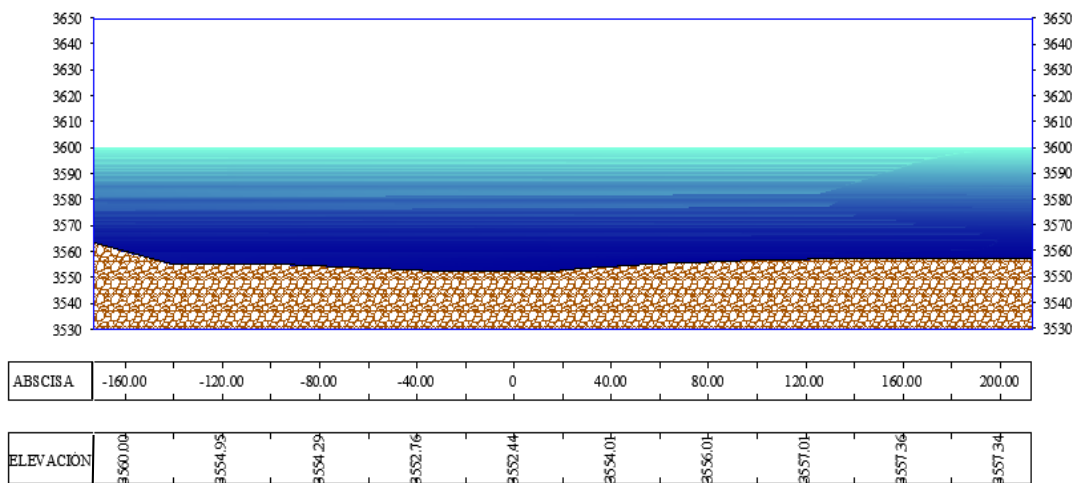


Figura 46. Perfil Transversal (Abscisa -160 a 200) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita)

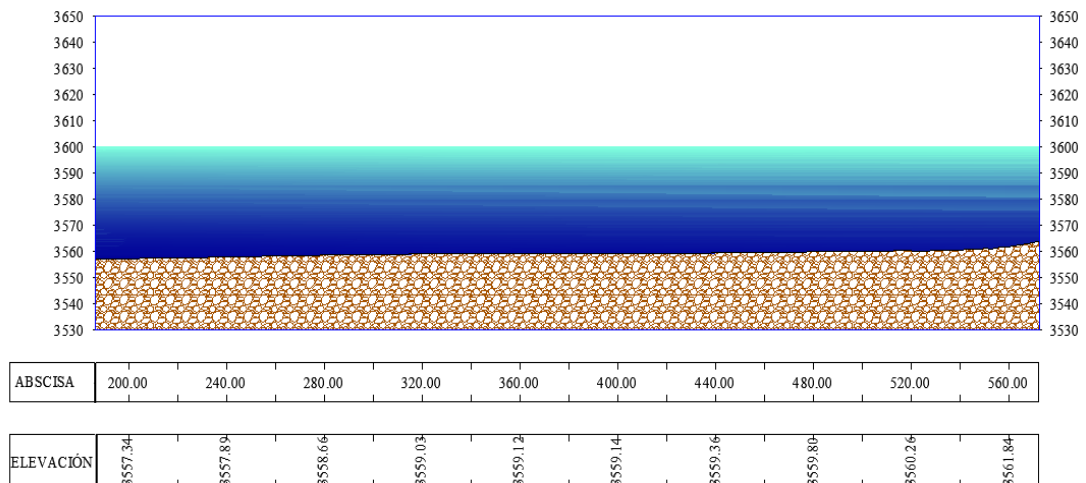


Figura 47. Perfil Transversal (Abscisa 200 a 560) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita)

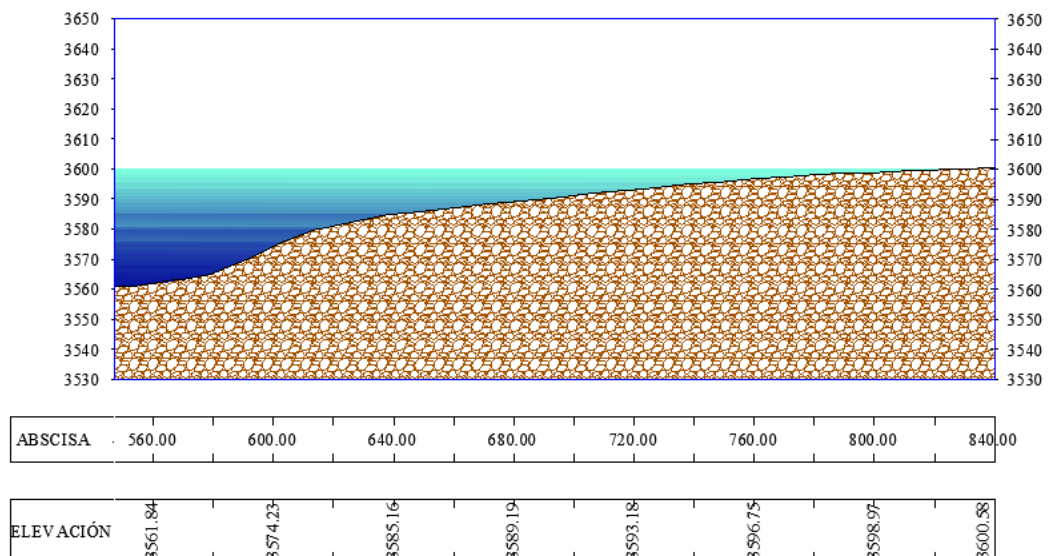


Figura 48. Perfil Transversal (Abscisa 560 a 840) - Área de corte para el punto 3 (Río Pita)

4.5.4 Altura del lahar

De igual manera Aguilera y Toulkeridis (2004-2005), recomiendan realizar el cálculo del impacto de la primera llegada de la ola con respecto a un evento del 10% de la fusión del glaciar del volcán Cotopaxi que le corresponde a cada cuenca de estudio, de tal manera que el tiempo estimado de arribo hacia cada punto de cierre es de 15 minutos (900 segundos).

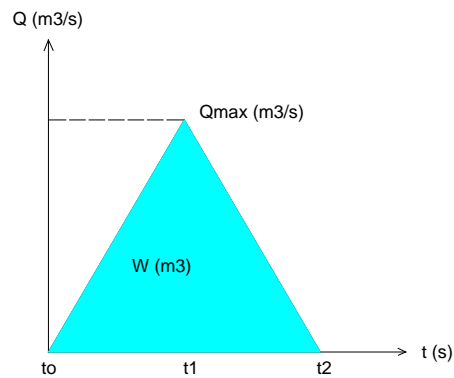


Figura 49. Hidrograma

En función del hidrograma se calcula el área bajo la curva que representa el volumen.

$$V = \frac{Q_{max} * t}{2}$$

$$Q_{max} = \frac{2 * V}{t}$$

Donde:

- V : Volumen de embalse (m^3).
- Q_{max} : Caudal máximo en el punto de cierre (m^3/s).
- t : Tiempo que demora en arribar el material hasta el punto de cierre (s).

Tabla 12

Caudal máximo en función de volumen de embalse

| Río | Volumen embalse (10%)(hm^3) | Volumen embalse (10%)(m^3) | Q m^3/s |
|----------|---------------------------------|--------------------------------|-----------|
| El Salto | 1,29 | 1293209,67 | 1436,90 |
| Pita | 11,51 | 11511579,41 | 12790,64 |

Para hallar la altura del lahar, estimamos el gasto máximo que puede presentarse durante una avenida reciente en un río. Para la aplicación contamos con la topografía de un tramo del cauce lo más uniforme posible y con las marcas del nivel del agua durante el paso de la avenida. Según la fórmula de Manning, la velocidad es:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

$$R = \frac{\text{Área de flujo}}{\text{Perímetro mojado}}$$

Donde:

- n: Coeficiente de rugosidad.
- R: Radio Hidráulico
- S_f: Pendiente motriz en flujo uniforme

Además para hallar el caudal aplicamos la ecuación de continuidad, que es la siguiente:

$$Q = AV$$

Cada área de flujo y perímetro mojado fueron obtenidos de los perfiles transversales realizados en el CivilCAD.

Para la velocidad teórica se aplicó la ecuación de Zolotarev propuesta por la Norma USN-03-76 (Rusia, 1976).

$$V_T = 11.4H^{1/2}S_f^{1/3}$$

Los valores obtenidos con lo expuesto anteriormente se presentan a continuación, para el caso de los ríos El Salto y Pita.

4.5.4.1 Altura del lahar para el río El Salto

Par el coeficiente de rugosidad utilizamos un valor de 0.06, puesto que es un curso natural en donde existen pastos y rocas con presencia de más rocas.
Sf=0.034

Tabla 13
Cálculo del radio hidráulico

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Perímetro (m) | Área (m ²) | R |
|-------------------|---------------|------------------|---------------------------|---------|
| 3260 | 0 | | | |
| 3261 | 1 | 25,93 | 23,55 | 0,9082 |
| 3262 | 2 | 28,89 | 49,76 | 1,7224 |
| 3263 | 3 | 32,32 | 78,67 | 2,4341 |
| 3264 | 4 | 35,76 | 110,37 | 3,0864 |
| 3265 | 5 | 39,22 | 144,98 | 3,6966 |
| 3270 | 10 | 53,78 | 350,37 | 6,5149 |
| 3275 | 15 | 67,72 | 606,94 | 8,9625 |
| 3280 | 20 | 81,67 | 912,4 | 11,1718 |
| 3285 | 25 | 95,83 | 1266,7 | 13,2182 |
| 3290 | 30 | 110,39 | 1673,01 | 15,1554 |
| 3295 | 35 | 125,24 | 2132,38 | 17,0263 |

Tabla 14
Cálculo del caudal

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Velocidad Teórica (m/s) | Velocidad Manning (m/s) | Caudal (m ³ /s) |
|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 3260 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3261 | 1 | 3,68 | 2,87 | 67,61 |
| 3262 | 2 | 5,21 | 4,40 | 218,88 |
| 3263 | 3 | 6,38 | 5,54 | 435,79 |
| 3264 | 4 | 7,37 | 6,49 | 716,25 |
| 3265 | 5 | 8,24 | 7,32 | 1061,10 |
| 3270 | 10 | 11,65 | 10,68 | 3741,48 |
| 3275 | 15 | 14,27 | 13,21 | 8016,98 |
| 3280 | 20 | 16,47 | 15,30 | 13958,74 |
| 3285 | 25 | 18,42 | 17,11 | 21678,76 |
| 3290 | 30 | 20,18 | 18,75 | 31365,84 |
| 3295 | 35 | 21,79 | 20,26 | 43204,09 |

Tabla 15
Cálculo del radio hidráulico ajustado

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Perímetro (m) | Área (m ²) | R |
|-------------------|---------------|------------------|---------------------------|---------------|
| 3265 | 5 | 39,22 | 144,98 | 3,6966 |
| 3265,5 | 5,5 | 40,66 | 163,19 | 4,0139 |
| 3265,6 | 5,6 | 40,94 | 166,89 | 4,0765 |
| 3265,7 | 5,7 | 41,23 | 170,62 | 4,1382 |
| 3265,8 | 5,8 | 41,52 | 174,36 | 4,1996 |
| 3265,9 | 5,9 | 41,81 | 178,13 | 4,2608 |
| 3266 | 6 | 42,09 | 181,91 | 4,3215 |

Tabla 16
Cálculo del caudal ajustado

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Velocidad Teórica (m/s) | Velocidad Manning (m/s) | Caudal (m ³ /s) |
|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 3265 | 5 | 8,24 | 7,32 | 1061,10 |
| 3265,5 | 5,5 | 8,64 | 7,73 | 1261,77 |
| 3265,6 | 5,6 | 8,72 | 7,81 | 1303,76 |
| 3265,7 | 5,7 | 8,79 | 7,89 | 1346,28 |
| 3265,8 | 5,8 | 8,87 | 7,97 | 1389,42 |
| 3265,9 | 5,9 | 8,95 | 8,05 | 1433,19 |
| 3266 | 6 | 9,02 | 8,12 | 1477,50 |

Para el río El Salto la altura con la que choca el flujo de lodo y escombros en el primer impacto es de 6 metros.

La fuerza de impacto del lahar se calcula con la ecuación propuesta por la Norma de la Federación Rusa para Estructuras de Mitigación de Riesgos (2007).

$$F = C_p * A * \frac{V^2}{2g} * \gamma$$

Donde:

- C_p : 4.5
- A: Área de impacto (m^2).
- V: Velocidad del flujo (m/s).
- g: 9,8 (m/s^2).
- γ : Peso específico del lahar ($2.2 T/m^3$).

Tabla 17

Fuerza de impacto para la presa del río El Salto

| Velocidad (m/s) | Altura de ola (m) | Área de impacto (m^2) | Fuerza de impacto (T) | Momento (T.m) |
|-----------------|-------------------|---------------------------|-----------------------|---------------|
| 8,12 | 6,00 | 181,91 | 6058,26 | 18174,77 |

4.5.4.2 Altura del lahar para el río Pita

Par el coeficiente de rugosidad utilizamos un valor de 0.05, puesto que es un curso natural en donde existen pastos y rocas.

$$S_f = 0.028$$

Tabla 18

Cálculo del radio hidráulico

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Perímetro (m) | Área (m^2) | R |
|----------------|------------|---------------|----------------|---------|
| 3552,44 | 0 | 140,80 | 212,83 | 1,5116 |
| 3555 | 2,56 | 194,78 | 260,08 | 1,3353 |
| 3556 | 3,56 | 224,12 | 468,43 | 2,0901 |
| 3557 | 4,56 | 267,11 | 708,63 | 2,6530 |
| 3558 | 5,56 | 398,29 | 1056,76 | 2,6532 |
| 3559 | 6,56 | 452,14 | 1481,96 | 3,2777 |
| 3560 | 7,56 | 662,02 | 2082,3 | 3,1454 |
| 3565 | 12,56 | 760,10 | 5726,71 | 7,5342 |
| 3570 | 17,56 | 813,96 | 9640,92 | 11,8445 |
| 3575 | 22,56 | 929,29 | 14032,86 | 15,1006 |
| 3580 | 27,56 | 968,62 | 18749,68 | 19,3571 |
| 3585 | 32,56 | 1011,42 | 23664,45 | 23,3973 |

Tabla 19

Cálculo del caudal

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Velocidad Teórica (m/s) | Velocidad Manning (m/s) | Caudal (m ³ /s) |
|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 3552,44 | 0 | 0,00 | 4,41 | 939,31 |
| 3555 | 2,56 | 5,54 | 4,06 | 1056,75 |
| 3556 | 3,56 | 6,54 | 5,48 | 2565,93 |
| 3557 | 4,56 | 7,40 | 6,42 | 4550,53 |
| 3558 | 5,56 | 8,17 | 6,42 | 6786,58 |
| 3559 | 6,56 | 8,87 | 7,39 | 10957,26 |
| 3560 | 7,56 | 9,53 | 7,19 | 14978,95 |
| 3565 | 12,56 | 12,28 | 12,88 | 73748,19 |
| 3570 | 17,56 | 14,52 | 17,41 | 167861,84 |
| 3575 | 22,56 | 16,46 | 20,47 | 287276,01 |
| 3580 | 27,56 | 18,19 | 24,16 | 452943,50 |
| 3585 | 32,56 | 19,77 | 27,41 | 648678,57 |

Tabla 20

Cálculo del radio hidráulico ajustado

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Perímetro (m) | Área (m ²) | R |
|-------------------|---------------|------------------|---------------------------|--------|
| 3559,5 | 7,06 | 616,63 | 1765,09 | 2,8625 |
| 3559,6 | 7,16 | 623,08 | 1826,68 | 2,9317 |
| 3559,7 | 7,26 | 630,62 | 1889,20 | 2,9958 |
| 3559,8 | 7,36 | 658,03 | 1952,32 | 2,9669 |

Tabla 21

Cálculo del caudal ajustado

| Cota (m.s.n.m) | Altura (m) | Velocidad Teórica (m/s) | Velocidad Manning (m/s) | Caudal (m ³ /s) |
|-------------------|---------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 3559,5 | 7,06 | 9,21 | 6,76 | 11923,90 |
| 3559,6 | 7,16 | 9,27 | 6,86 | 12538,09 |
| 3559,7 | 7,26 | 9,34 | 6,96 | 13155,52 |
| 3559,8 | 7,36 | 9,40 | 6,92 | 13507,59 |

Para el río Pita la altura con la que choca el flujo de lodo y escombros en el primer impacto es de 7.26 metros.

De igual forma se aplica la ecuación propuesta por la Norma de la Federación Rusa para Estructuras de Mitigación de Riesgos (2007), para hallar la fuerza de impacto generada por el flujo de lodo y escombros.

$$F = C_p * A * \frac{V^2}{2g} * \gamma$$

Tabla 22

Fuerza de impacto para la presa del río Pita

| Velocidad (m/s) | Altura de ola (m) | Área de impacto (m ²) | Fuerza de impacto (T) | Momento (T.m) |
|-----------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|---------------|
| 6,96 | 7,26 | 1889,20 | 46224,85 | 167796,22 |

4.6 Estudio hidrológico e hidráulico

4.6.1 Parámetros morfométricos

Las características físicas de una cuenca dependen de parámetros morfométricos como son:

- Red hidrográfica y el sistema pluvial, dentro de este grupo están la longitud del río principal, densidad de drenaje y la pendiente longitudinal del río principal.
- Superficie y forma, este grupo está conformado por el área de la cuenca, perímetro de la cuenca, coeficiente de compacidad, altura media de la cuenca y la pendiente promedio de la cuenca.

Fórmulas empleadas:

- Densidad de drenaje

$$Dd = \frac{Lr + \sum Li}{Ac}$$

- Pendiente longitudinal del río principal

$$Yr = \frac{\Delta h}{Lr}$$

- Coeficiente de compacidad

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi Ac}}$$

Tabla 23

Rangos del coeficiente de compacidad

| Kc | Forma de la cuenca | Posibilidad de producir crecidas con mayores picos (caudales) |
|-------------|------------------------------------|--|
| 1.00 - 1.25 | Casi redonda a oval redonda | Alta |
| 1.25 - 1.50 | Oval redonda a oval oblonga | Media |
| 1.50 - 1.75 | Oval oblonga a rectangular oblonga | Baja |
| > 1.75 | Alargada | Muy baja |

Fuente: (Villacis)

- Altura media de la cuenca

$$Hmb = \frac{\Delta h}{2}$$

Los parámetros mencionados son detallados en las siguientes tablas para las dos cuencas hidrográficas de estudio, de esta manera se proporciona la posibilidad de conocer la variación en el espacio de los elementos del régimen hidrológico de cada cuenca.

4.6.1.1 Cuenca hidrográfica superficial del río El Salto

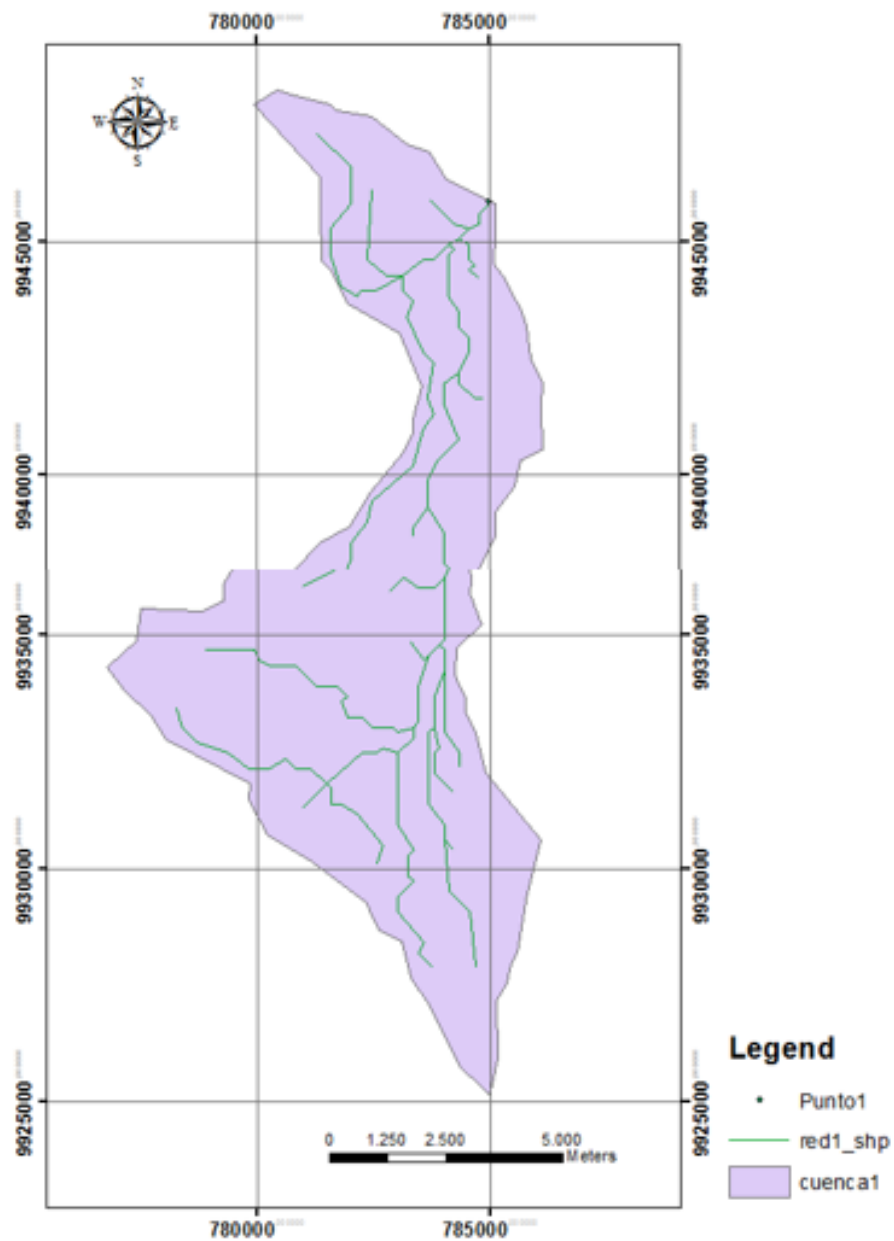


Figura 50. Cuenca hidrográfica superficial para el río El Salto

Tabla 24

Parámetros morfométricos para la cuenca hidrográfica superficial del río El Salto

| Nombre del parámetro | Símbolo | Unid. Medida | Valor | Método de medición | Observaciones |
|--|---------|--------------------|---------|--------------------------|---|
| Longitud río principal | Lr | Km | 19,66 | AutoCAD | ----- |
| Densidad de drenaje | Dd | Km/Km ² | 0,83 | Fórmula | Dd<1, Baja |
| Pendiente longitudinal de río principal | Yr | ‰ | 41,69 | Excel, AutoCAD y fórmula | Pendiente suavizada Yrb=58,25‰; Yrs=41,69‰ |
| Área de la cuenca hidrográfica superficial | Ac | km ² | 88,75 | AutoCAD | ----- |
| Perímetro de cuenca hidrográfica superficial | P | km | 63,08 | AutoCAD | ----- |
| Coeficiente de compacidad | Kc | --- | 1,89 | Fórmula | Forma alargada |
| Altura media de la cuenca hidrográfica superficial | Hm | msnm | 3855,05 | Excel, AutoCAD y fórmula | Pendiente suavizada Hmb=4555m; Hmc=3855,05m |
| Pendiente promedio de la cuenca hidrográfica superficial | Yc | ‰ | 183,07 | Excel, AutoCAD y fórmula | Yc>Yr ; donde Yr es suavizada |

4.6.1.2 Cuenca hidrográfica superficial del río Pita

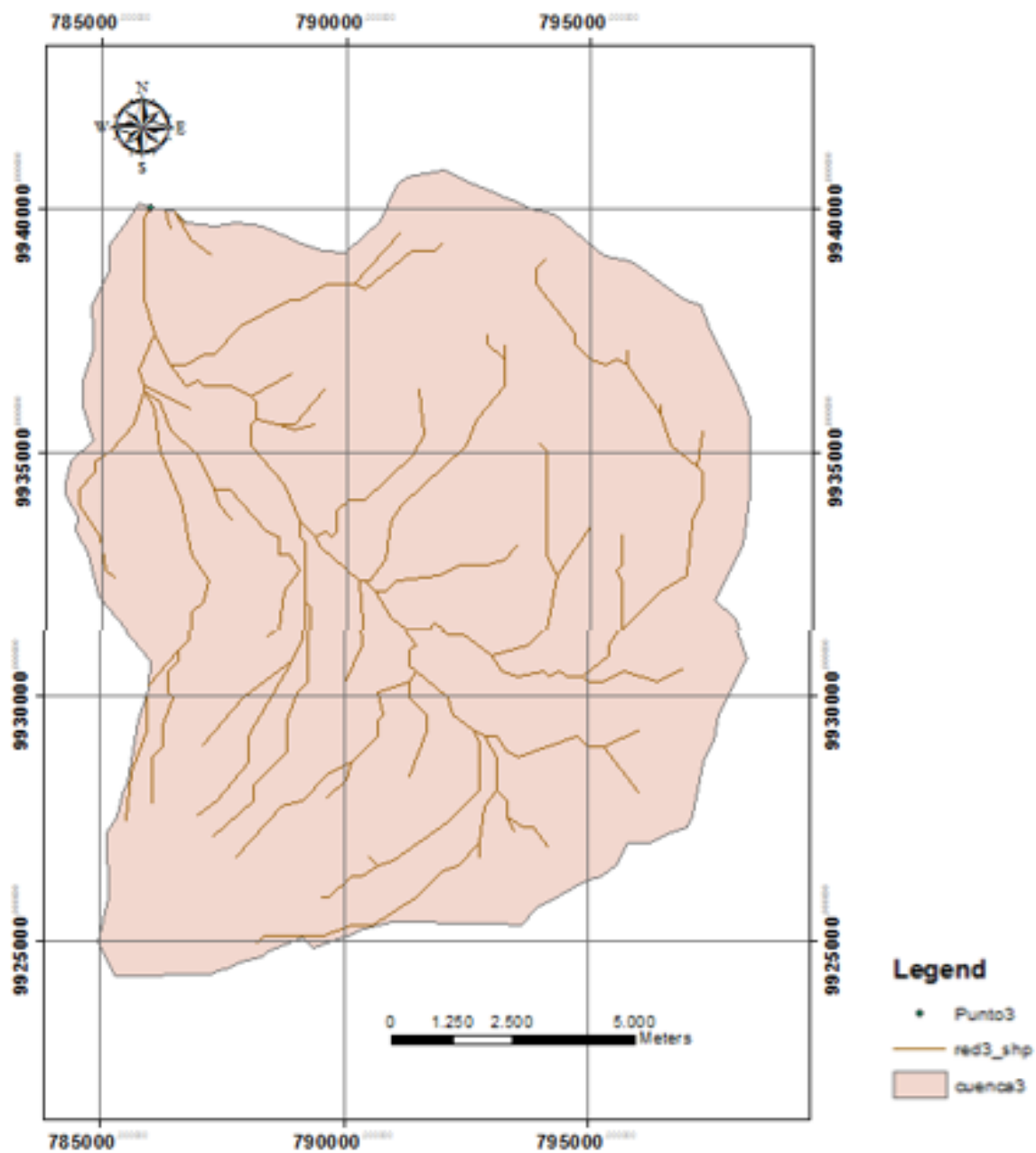


Figura 51. Cuenca hidrográfica superficial para el río Pita

Tabla 25
Parámetros morfométricos para la cuenca hidrográfica superficial del río Pita

| Nombre del parámetro | Símbolo | Unid. Medida | Valor | Método de medición | Observaciones |
|--|---------|--------------------|---------|--------------------------|--|
| Longitud río principal | Lr | Km | 22,08 | AutoCAD | ----- - |
| Densidad de drenaje | Dd | Km/Km ² | 0,79 | Fórmula | Dd<1, Baja |
| Pendiente longitudinal de río principal | Yr | ‰ | 34,92 | Excel, AutoCAD y fórmula | Pendiente suavizada Yrb=42,11‰; Yrs=34,92‰ |
| Área de la cuenca hidrográfica superficial | Ac | Km ² | 179,18 | AutoCAD | ----- |
| Perímetro de cuenca hidrográfica superficial | P | Km | 55,03 | AutoCAD | ----- |
| Coefficiente de compacidad | Kc | --- | 1,16 | Fórmula | Forma casi redonda a oval redonda |
| Altura media de la cuenca hidrográfica superficial | Hm | msnm | 4050,97 | Excel, AutoCAD y fórmula | Pendiente suavizada Hmb=4702,50m; Hmc=4050,97m |
| Pendiente promedio de la cuenca hidrográfica superficial | Yc | ‰ | 205,58 | Excel, AutoCAD y fórmula | Yc>Yr ; donde Yr es suavizada |

4.6.2 Tiempo de concentración

Para hallar el tiempo de concentración utilizamos varias fórmulas de diferentes autores, posteriormente promediamos los resultados obtenidos y el resultado es el que utilizamos para los posteriores cálculos.

4.6.2.1 Cuenca hidrográfica superficial del río El Salto

Para el río el salto el tiempo de concentración es:

$$T_c = 123,03 \text{ min}$$

Tabla 26
Tiempos de concentración

| Autor | Fórmula | Unidad | Valor | Observaciones |
|----------------|---|--------|--------|--------------------------|
| California | $T_c = 58 \left(\frac{Lr^3}{H} \right)^{0,385}$ | min | 120,17 | Lr=Km; ΔH=m; Tc=min |
| | $T_c = 4 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Yr}} \right)^{0,77}$ | min | 134,70 | Lr=Km; Yr=módulo; Tc=min |
| Ramser Kirpich | $T_c = 0,195 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Yc}} \right)^{0,77}$ | min | 128,80 | Lr=m; Yc=%; Tc= min |
| | $T_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$ | min | 117,86 | Lr=m; ΔH=m; Tc=min |
| Ven te Chow | $T_c = 0,483 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Yrs}} \right)^{0,64}$ | min | 81,92 | Lr=m; Yr=‰; Tc= min |
| Guire | $T_c = 0,0256 \left(\frac{\sqrt{Lr^3}}{\sqrt{H}} \right)^{0,77}$ | min | 154,74 | Lr=m; H=m |

4.6.2.2 Cuenca hidrográfica superficial del río Pita

$$T_c = 145,44 \text{ min}$$

Tabla 27
Tiempos de concentración

| Autor | Fórmula | Unidad | Valor | Observaciones |
|----------------|--|--------|--------|--------------------------|
| California | $T_c = 58 \left(\frac{Lr^3}{H} \right)^{0,385}$ | min | 148,92 | Lr=Km; ΔH=m; Tc=min |
| | $T_c = 4 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Yr}} \right)^{0,77}$ | min | 157,73 | Lr=Km; Yr=módulo; Tc=min |
| Ramser Kirpich | $T_c = 0,195 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Yc}} \right)^{0,77}$ | min | 134,73 | Lr=m; Yc=%; Tc= min |
| | $T_c = 0,0195 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385}$ | min | 146,07 | Lr=m; ΔH=m; Tc=min |

CONTINÚA 

| | | | | |
|------------|--|-----|--------|------------------------|
| Vente Chow | $Tc = 0,483 \left(\frac{Lr}{\sqrt{Yrs}} \right)^{0,64}$ | min | 93,40 | Lr=m; Yr=°/oo; Tc= min |
| Guire | $Tc = 0,0256 \left(\frac{\sqrt{Lr^3}}{\sqrt{H}} \right)^{0,77}$ | min | 191,77 | Lr=m; H=m |

4.6.3 Caudal de diseño para la alcantarilla

Utilizando la fórmula Regional es necesario realizar la distribución de Pearson tipo III, para los datos de los caudales máximos de la estación de aforo H0158 del flanco norte del volcán Cotopaxi.

Tabla 28

Caudales máximos de la estación de aforo H0158

| N° | Años | Q (máx.) |
|----|------|----------|
| 1 | 1964 | 13,64 |
| 2 | 1965 | 9,402 |
| 3 | 1966 | 7,982 |
| 4 | 1967 | 7,253 |
| 5 | 1968 | 6,600 |
| 6 | 1969 | 4,674 |
| 7 | 1970 | 3,398 |
| 8 | 1971 | 6,325 |
| 9 | 1972 | 2,850 |
| 10 | 1973 | 2,035 |
| 11 | 1974 | 10,388 |
| 12 | 1975 | 9,287 |
| 13 | 1976 | 12,588 |
| 14 | 1977 | 6,235 |
| 15 | 1979 | 2,298 |
| 16 | 1980 | 5,261 |
| 17 | 1981 | 5,824 |
| 18 | 1983 | 8,054 |
| 19 | 1984 | 6,887 |
| 20 | 1985 | 2,508 |
| 21 | 1986 | 5,941 |
| 22 | 1987 | 4,317 |
| 23 | 1988 | 4,932 |
| 24 | 1989 | 7,011 |

CONTINÚA



| | | |
|----|------|-------|
| 25 | 1990 | 2,879 |
| 26 | 1991 | 5,437 |
| 27 | 1992 | 3,681 |
| 28 | 1993 | 4,655 |
| 29 | 1994 | 5,350 |
| 30 | 1995 | 4,278 |
| 31 | 1996 | 4,470 |
| 32 | 1997 | 5,778 |
| 33 | 1998 | 7,365 |
| 34 | 1999 | 7,000 |
| 35 | 2000 | 4,686 |
| 37 | 2002 | 3,935 |
| 38 | 2003 | 4,173 |
| 39 | 2004 | 3,793 |
| 40 | 2005 | 3,888 |
| 41 | 2006 | 3,981 |
| 42 | 2007 | 7,000 |
| 43 | 2008 | 5,295 |
| 44 | 2009 | 3,894 |

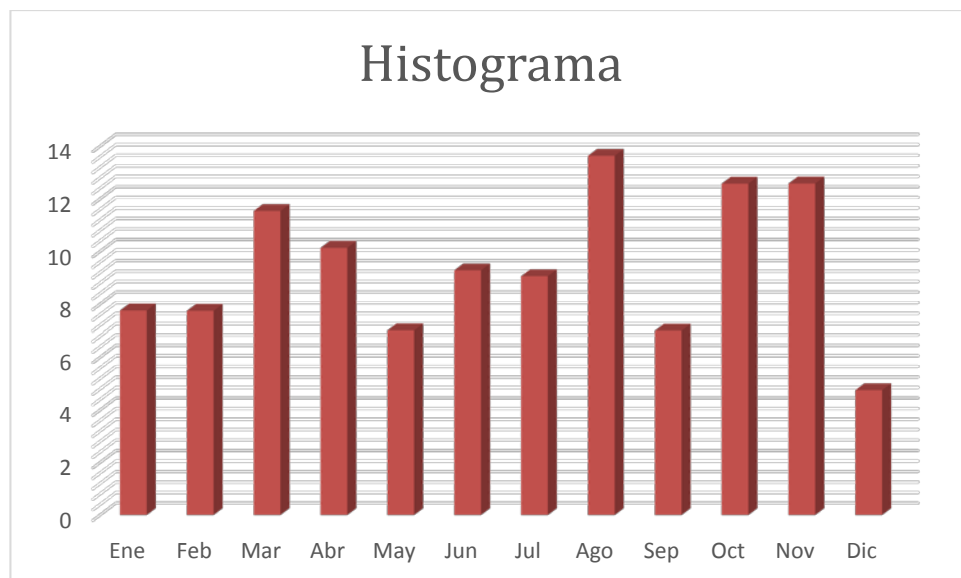


Figura 52. Histograma

Coefficiente de variación = 0.45

Coefficiente de asimetría = 0.90

En este caso la mejor opción es $C_s = 2C_v$, puesto que de esta manera la curva teórica se asemeja más a la curva empírica.

Tabla 29

Caudales máximos ordenados de la estación de aforo H0158

| Q (max) | K=Xi/Xr | (K-1) | (K-1) ² | (K-1) ³ | P=[(m-0,3)/(n+0,4)]*100 |
|---------|---------|--------|--------------------|--------------------|-------------------------|
| 13,640 | 2,388 | 1,388 | 1,927 | 2,675 | 1,577 |
| 12,588 | 2,204 | 1,204 | 1,450 | 1,745 | 3,829 |
| 10,388 | 1,819 | 0,819 | 0,670 | 0,549 | 6,081 |
| 9,402 | 1,646 | 0,646 | 0,418 | 0,270 | 8,333 |
| 9,287 | 1,626 | 0,626 | 0,392 | 0,245 | 10,586 |
| 8,054 | 1,410 | 0,410 | 0,168 | 0,069 | 12,838 |
| 7,982 | 1,398 | 0,398 | 0,158 | 0,063 | 15,090 |
| 7,365 | 1,290 | 0,290 | 0,084 | 0,024 | 17,342 |
| 7,253 | 1,270 | 0,270 | 0,073 | 0,020 | 19,595 |
| 7,011 | 1,228 | 0,228 | 0,052 | 0,012 | 21,847 |
| 7,000 | 1,226 | 0,226 | 0,051 | 0,011 | 24,099 |
| 7,000 | 1,226 | 0,226 | 0,051 | 0,011 | 26,351 |
| 6,887 | 1,206 | 0,206 | 0,042 | 0,009 | 28,604 |
| 6,600 | 1,156 | 0,156 | 0,024 | 0,004 | 30,856 |
| 6,325 | 1,107 | 0,107 | 0,012 | 0,001 | 33,108 |
| 6,235 | 1,092 | 0,092 | 0,008 | 0,001 | 35,360 |
| 5,941 | 1,040 | 0,040 | 0,002 | 0,000 | 37,613 |
| 5,824 | 1,020 | 0,020 | 0,000 | 0,000 | 39,865 |
| 5,778 | 1,012 | 0,012 | 0,000 | 0,000 | 42,117 |
| 5,437 | 0,952 | -0,048 | 0,002 | 0,000 | 44,369 |
| 5,350 | 0,937 | -0,063 | 0,004 | 0,000 | 46,622 |
| 5,295 | 0,927 | -0,073 | 0,005 | 0,000 | 48,874 |
| 5,261 | 0,921 | -0,079 | 0,006 | 0,000 | 51,126 |
| 4,932 | 0,864 | -0,136 | 0,019 | -0,003 | 53,378 |
| 4,686 | 0,820 | -0,180 | 0,032 | -0,006 | 55,631 |
| 4,674 | 0,818 | -0,182 | 0,033 | -0,006 | 57,883 |
| 4,655 | 0,815 | -0,185 | 0,034 | -0,006 | 60,135 |
| 4,470 | 0,783 | -0,217 | 0,047 | -0,010 | 62,387 |
| 4,317 | 0,756 | -0,244 | 0,060 | -0,015 | 64,640 |
| 4,278 | 0,749 | -0,251 | 0,063 | -0,016 | 66,892 |
| 4,173 | 0,731 | -0,269 | 0,073 | -0,020 | 69,144 |
| 4,077 | 0,714 | -0,286 | 0,082 | -0,023 | 71,396 |
| 3,981 | 0,697 | -0,303 | 0,092 | -0,028 | 73,649 |
| 3,935 | 0,689 | -0,311 | 0,097 | -0,030 | 75,901 |
| 3,894 | 0,682 | -0,318 | 0,101 | -0,032 | 78,153 |

CONTINUÍA



| | | | | | |
|-------|-------|--------|-------|--------|--------|
| 3,888 | 0,681 | -0,319 | 0,102 | -0,033 | 80,405 |
| 3,793 | 0,664 | -0,336 | 0,113 | -0,038 | 82,658 |
| 3,681 | 0,644 | -0,356 | 0,126 | -0,045 | 84,910 |
| 3,398 | 0,595 | -0,405 | 0,164 | -0,066 | 87,162 |
| 2,879 | 0,504 | -0,496 | 0,246 | -0,122 | 89,414 |
| 2,850 | 0,499 | -0,501 | 0,251 | -0,126 | 91,667 |
| 2,298 | 0,402 | -0,598 | 0,357 | -0,213 | 96,171 |
| 2,035 | 0,356 | -0,644 | 0,414 | -0,267 | 98,423 |

Caudal
promedio
5,711

0,000

8,420

4,428

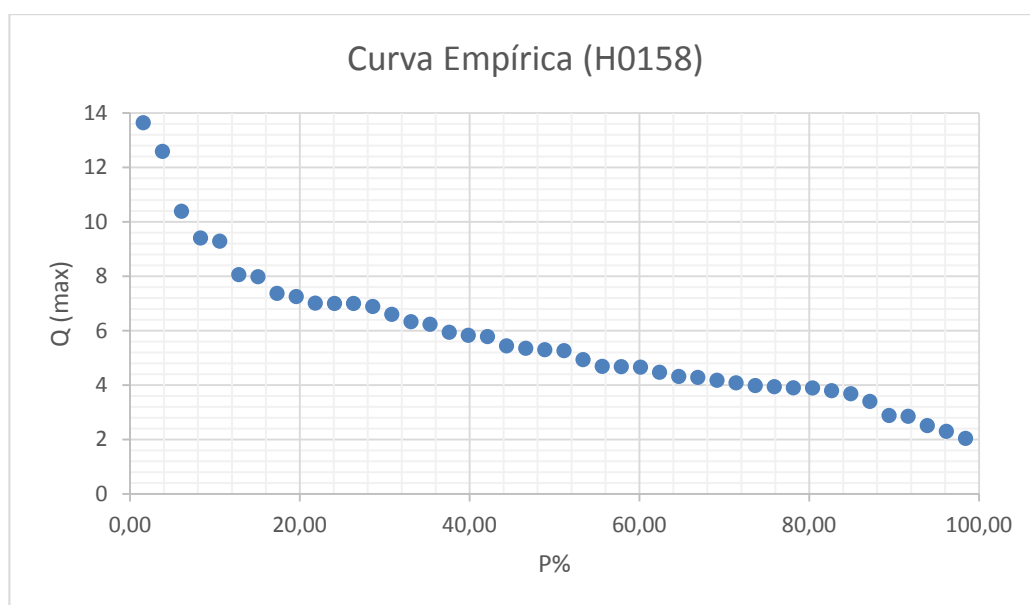


Figura 53. Curva empírica (Escala natural)

Tabla 30

Cs=2Cv

| Probabilidad % | 1 | 2 | 5 | 10 | 25 | 50 | 75 |
|----------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| Φ | 2,96 | 2,5 | 1,86 | 1,34 | 0,57 | -0,15 | -0,73 |
| $\Phi \cdot C_v$ | 1,310 | 1,106 | 0,823 | 0,593 | 0,252 | -0,066 | -0,323 |
| $K_p = \Phi \cdot C_v + 1$ | 2,310 | 2,106 | 1,823 | 1,593 | 1,252 | 0,934 | 0,677 |
| $X\% = K_p \cdot X_r$ | 13,192 | 12,030 | 10,412 | 9,098 | 7,152 | 5,332 | 3,867 |

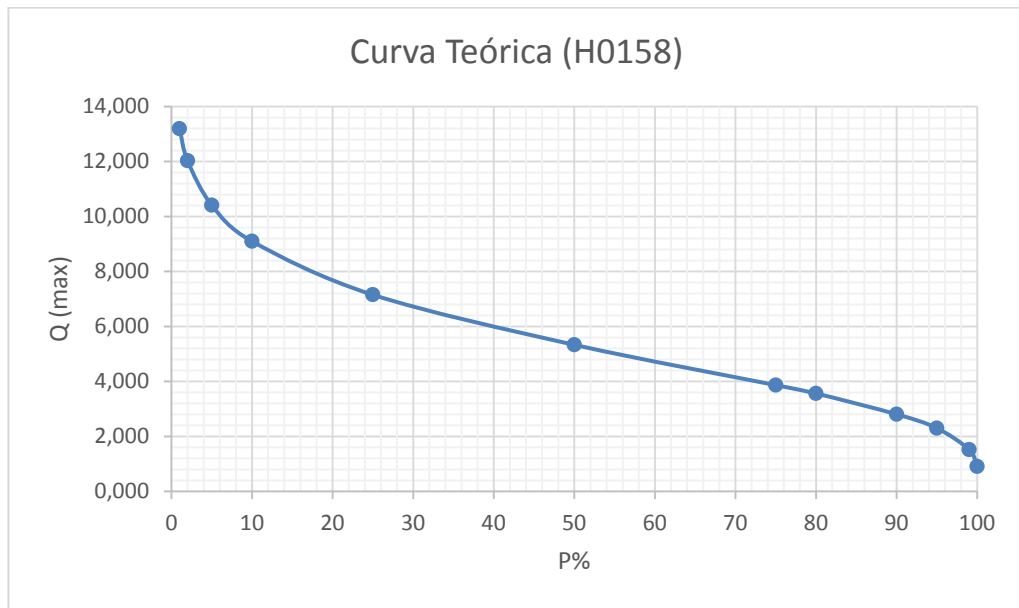


Figura 54. Curva teórica (Escala natural)

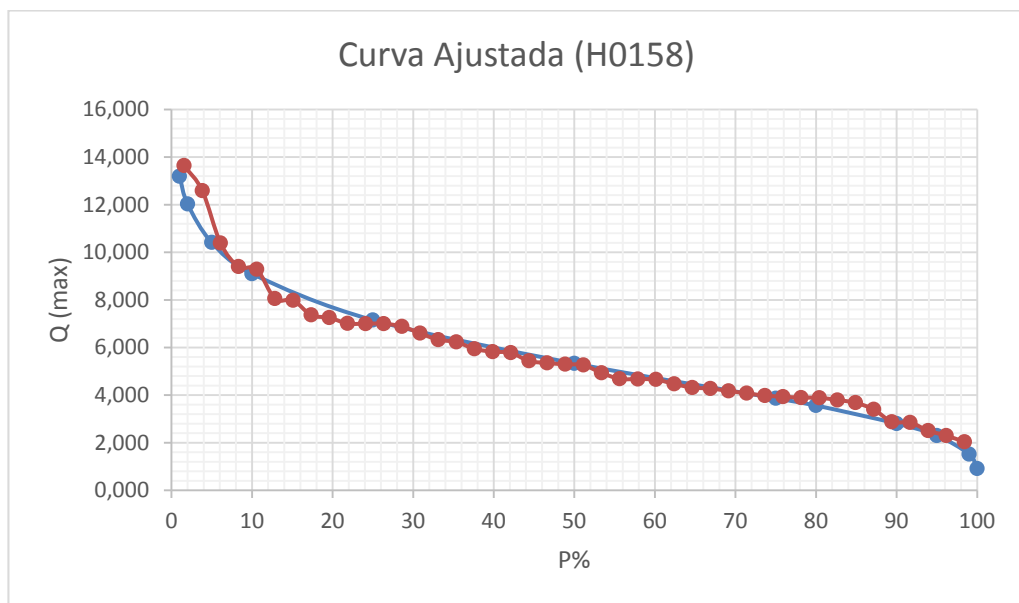


Figura 55. Curva ajustada $C_s=2C_v$

Mediante el software AutoCAD se halló el área de la cuenca para la estación de aforo de caudales máximos H0158.

$$A = 27,57 \text{ (Km}^2\text{)}$$

$$Q_{(5\%)} = 10,41 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Posteriormente se encontró el módulo q para hallar los respectivos caudales de diseño para los ríos El Salto y Pita.

$$q = \frac{Q}{A}$$

$$q = \frac{10412,37 \left(\frac{1}{s}\right)}{2757,18 \text{ (ha)}}$$

$$q = 3,7765 \text{ (l/s/ha)}$$

$$Q = q * A$$

$$Q_{\text{Río El Salto}} = 33,51 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

$$Q_{\text{Río Pita}} = 67,67 \text{ (m}^3\text{/s)}$$

4.7 Suelos

Para la caracterización geomecánica del terreno utilizamos una técnica geofísica, conocida como sísmica de refracción.

4.7.1 Sísmica de refracción

Actualmente la sísmica de refracción es uno de los métodos más empleados para el análisis de los terrenos. Con este método se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a los diferentes puntos de observación. Para esto se colocaron doce sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción.

La línea de refracción se colocó en los dos sitios de estudio (Punto 1 y Punto 3).



Figura 56. Línea de refracción para los puntos 1 y 3

A los extremos del tendido, en el punto de disparo, se generan ondas sísmicas, por la detonación de explosivos, las cuales indujeron vibraciones en el terreno que fueron detectadas por cada uno de los sensores en el tendido.



Figura 57. Explosivo y explosión en uno de los extremos

Los sismógrafos almacenaron los registros de cada sensor de los movimientos del terreno en función del tiempo. Estos fueron analizados en la refracción sísmica para obtener el tiempo de llegada de las primeras ondas a cada sensor desde el punto de disparo toda esta información es almacenada en un ordenador.

Posterior a la sísmica de refracción realizada en cada sitio de estudio se procedió a realizar los respectivos trabajos de gabinete para poder encontrar los V_p y V_s .

4.7.1.1 Punto 1 para el río El Salto

4.7.1.1.1 Velocidad de onda de compresión V_p

Para las ondas de compresión V_p se analizaron los datos obtenidos de los disparos directo y reverso conjuntamente.

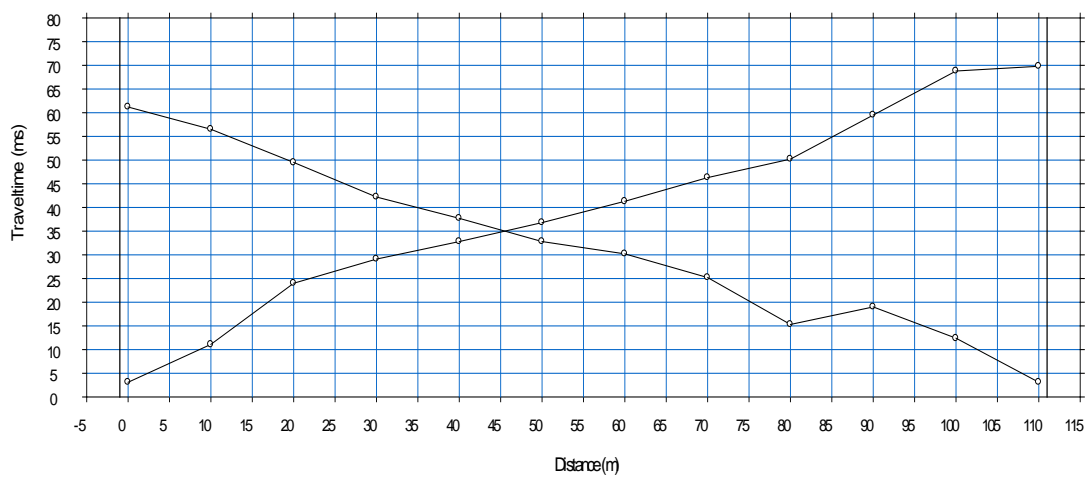


Figura 58. Domocrona – disparos directo y reverso

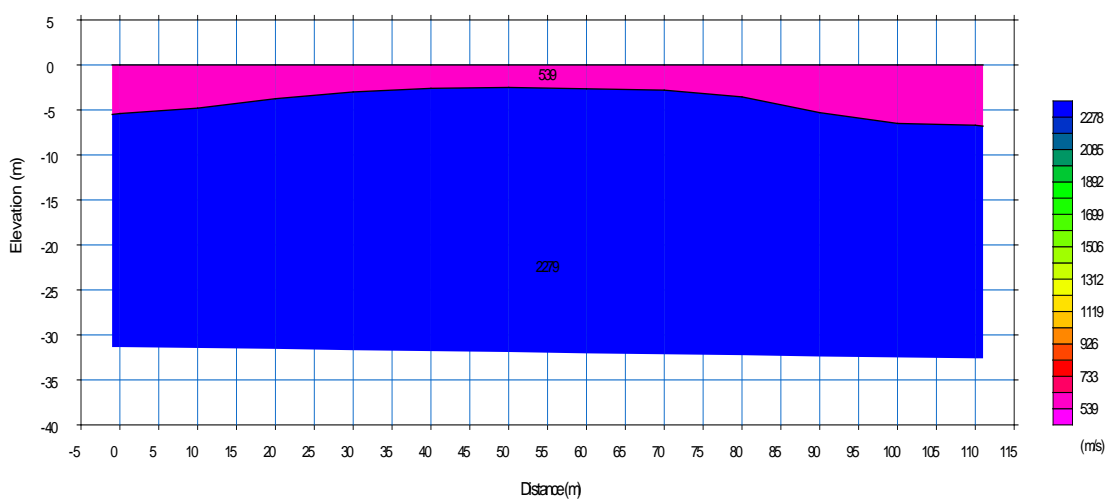


Figura 59. Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad

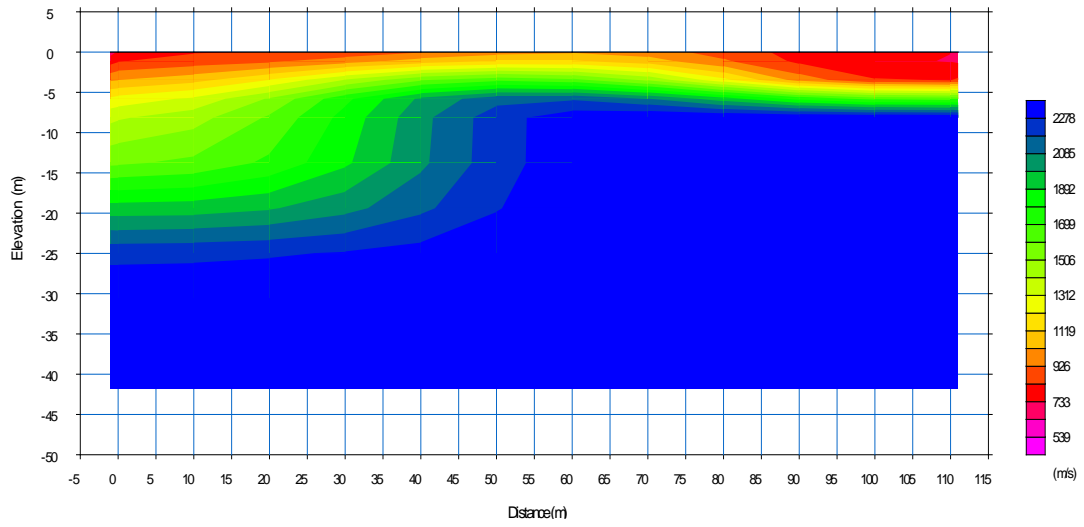


Figura 60. Tomografía de la línea sísmica

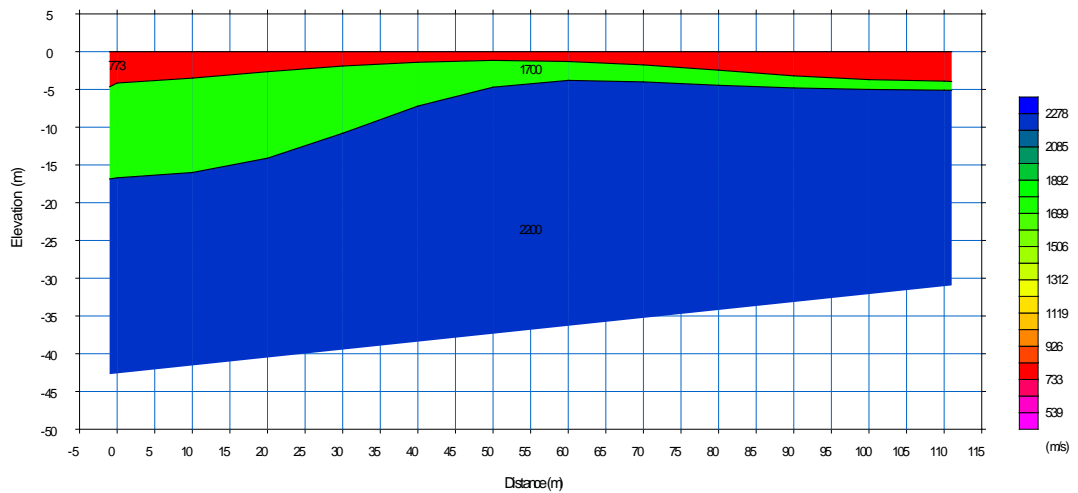


Figura 61. Perfil de sísmica de refracción (V_p)

4.7.1.1.2 Velocidad de onda de corte V_s

Para las ondas de corte V_s se procesaron los datos de cada disparo por separado (directo y reverso).

- Primera explosión (disparo directo)

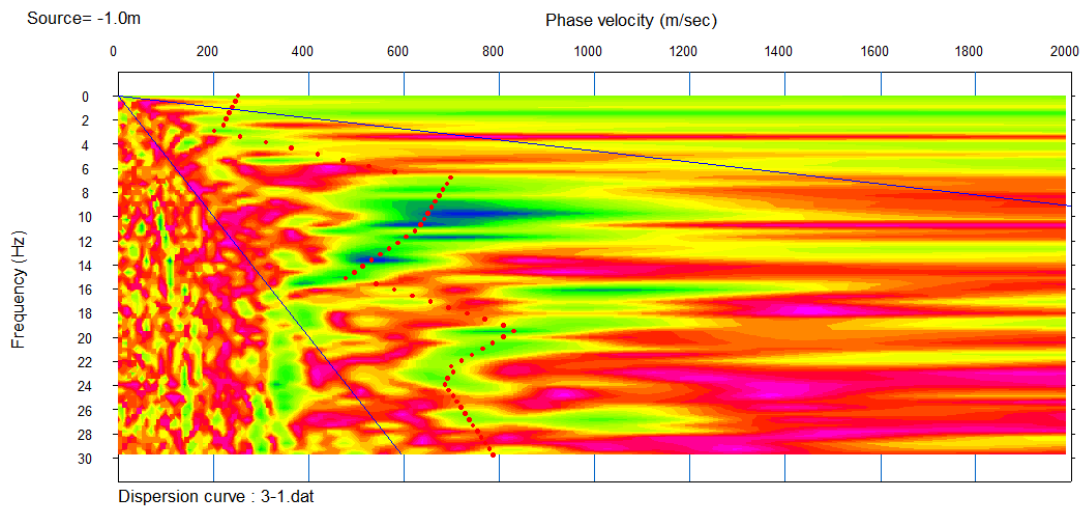


Figura 62. Tendencia de las primeras llegadas

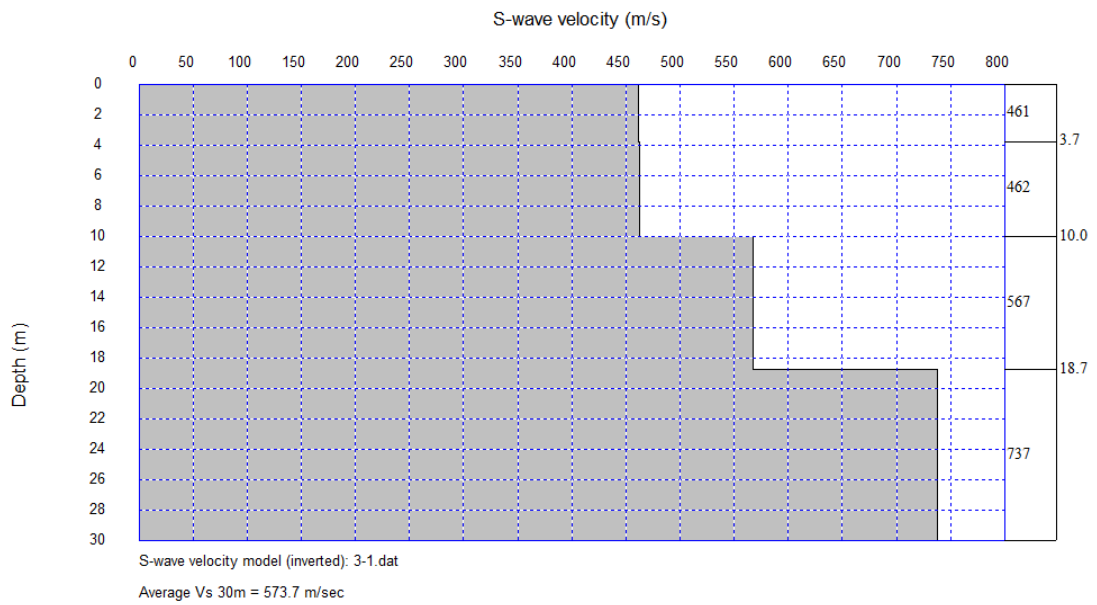


Figura 63. Vs₃₀

- Segunda explosión (disparo reverso)

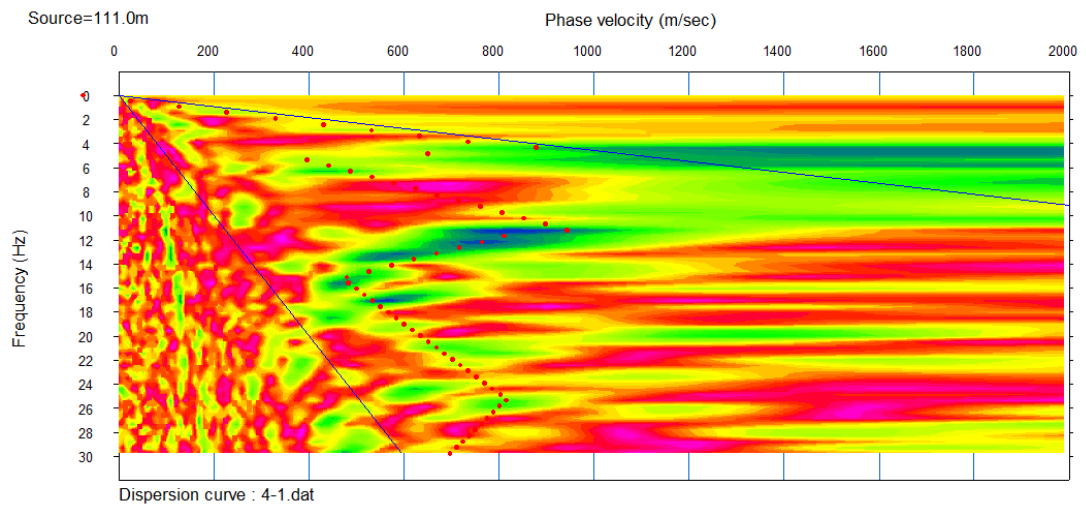


Figura 64. Tendencia de las primeras llegadas

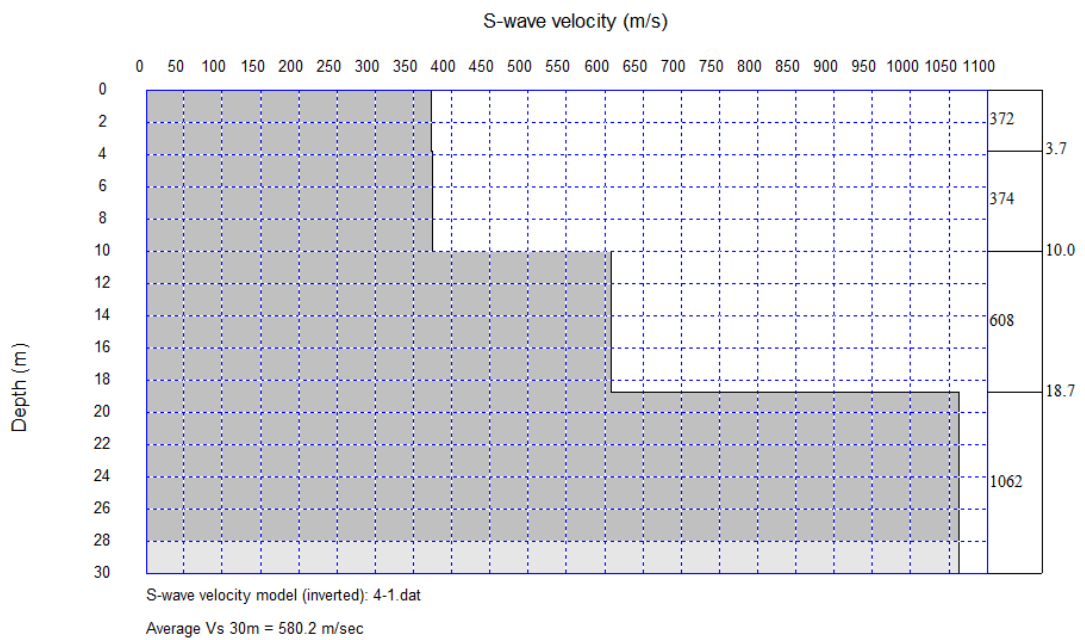


Figura 65. Vs₃₀

Se realizó un promedio para los Vs₃₀ obtenidos en cada disparo.

$$Vs_{30} = 576.95 \frac{m}{s}$$

4.7.1.2 Punto 3 para el río Pita

4.7.1.2.1 Velocidad de onda de compresión Vp

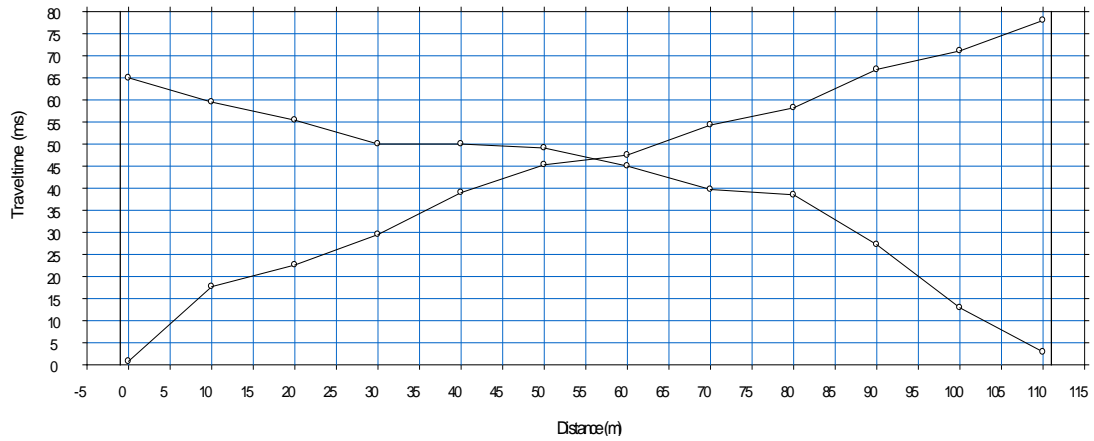


Figura 66. Domocrona – disparos directo y reverso

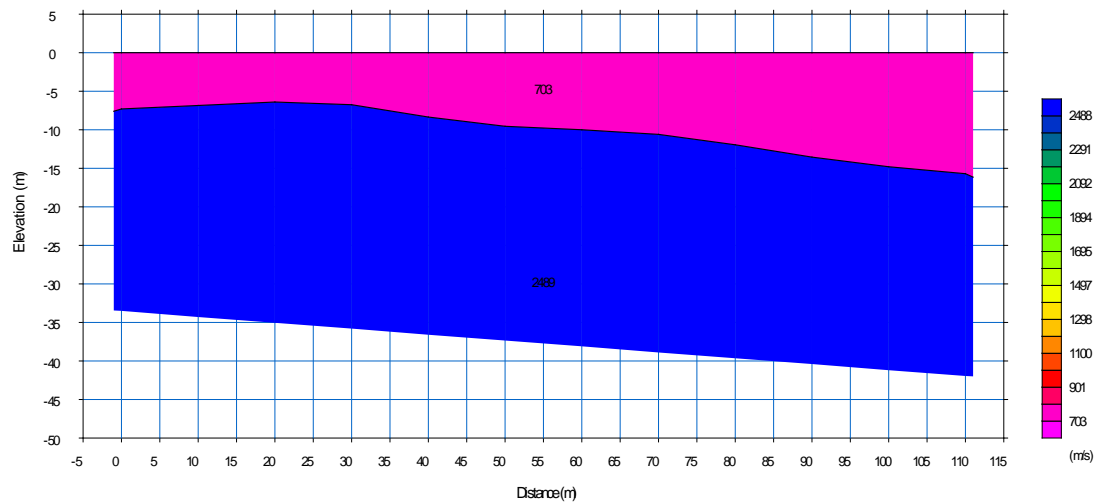


Figura 67. Modelo de dos capas, la inferior de mayor velocidad

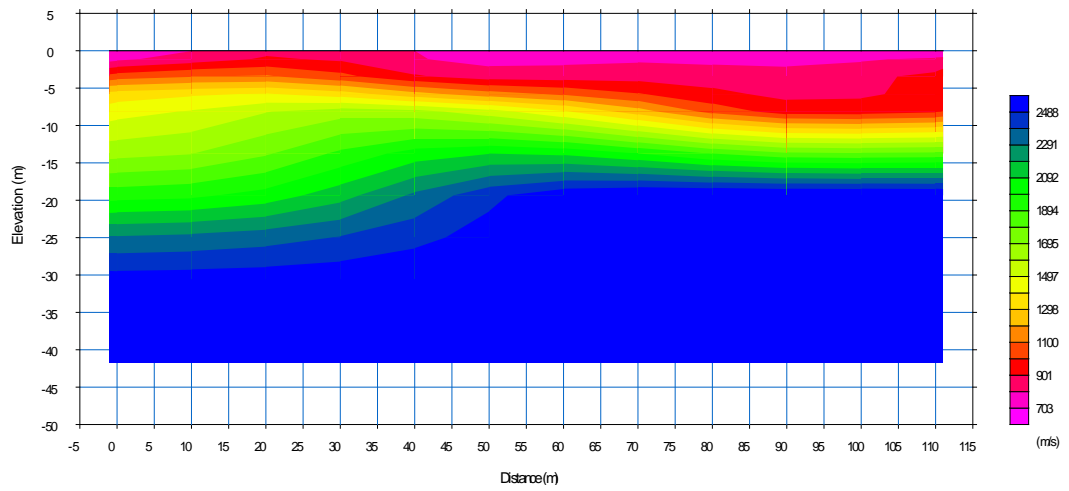


Figura 68. Tomografía de la línea sísmica

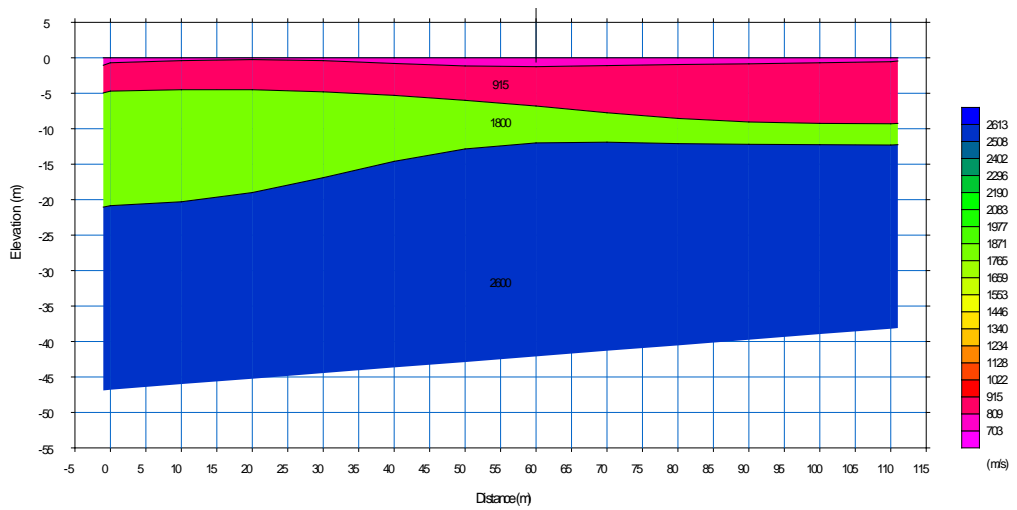


Figura 69. Perfil de sísmica de refracción (Vp)

4.7.1.2.2 Velocidad de onda de corte Vs

- Primera explosión (disparo directo)

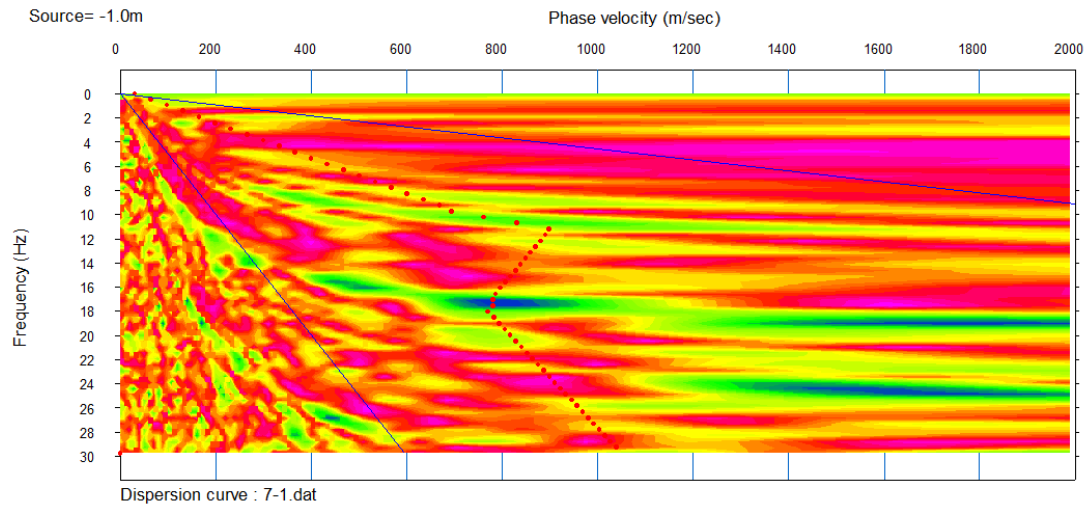


Figura 70. Tendencia de las primeras llegadas

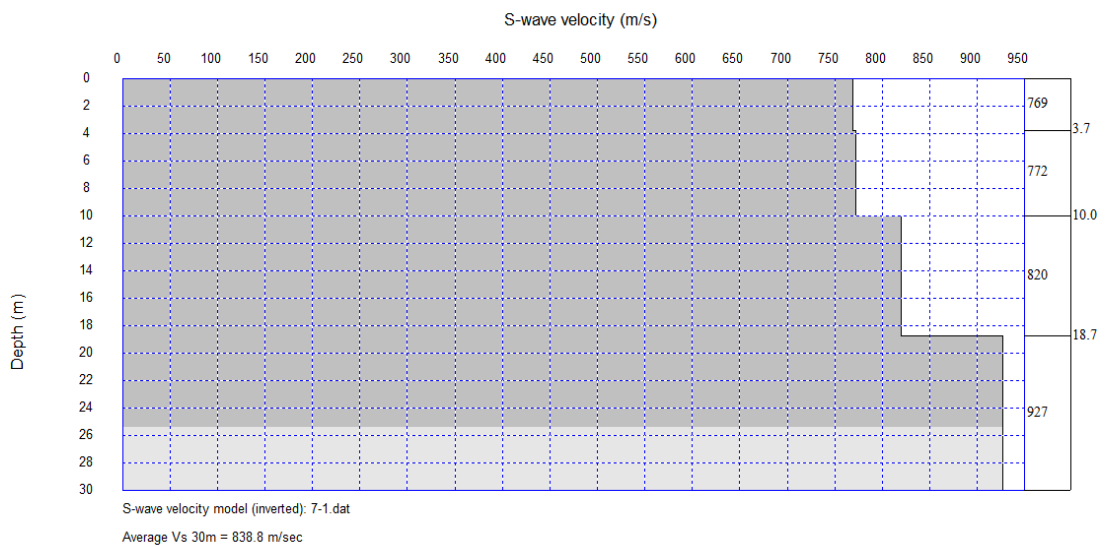


Figura 71. Vs₃₀

- Segunda explosión (disparo reverso)

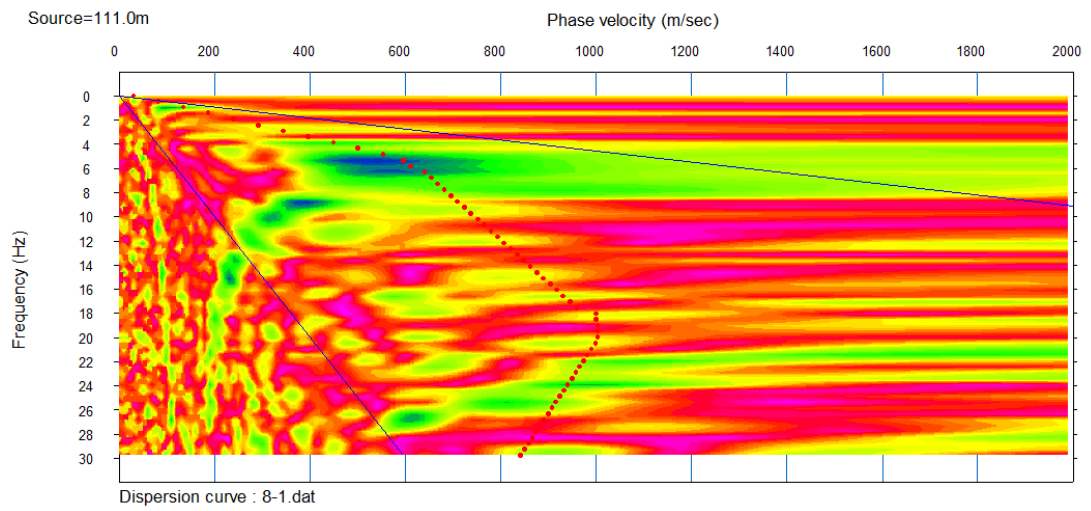


Figura 72. Tendencia de las primeras llegadas

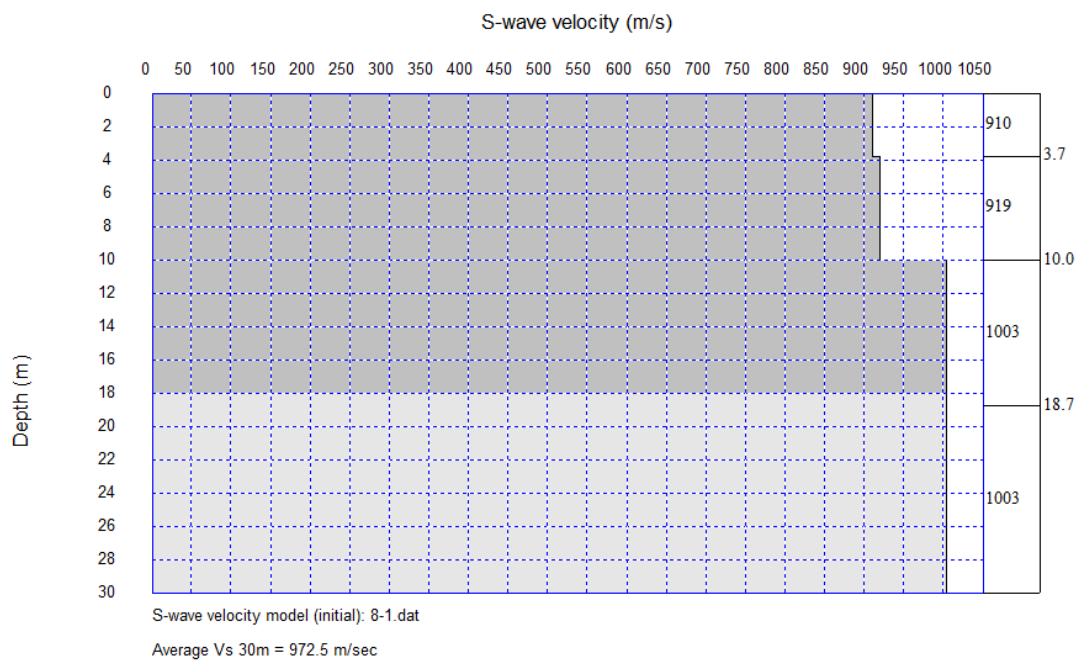


Figura 73. Vs₃₀

$$Vs_{30} = 905.65 \frac{m}{s}$$

4.7.2 Tipos de perfil de suelo

En la Norma Ecuatoriana de la Construcción se definen seis tipos de perfil de suelo. Los parámetros utilizados en la clasificación son los correspondientes a los 30 m superiores del perfil para los perfiles tipo A, B, C, D y E.

Tabla 31
Clasificación de los perfiles de suelo

| Tipo de perfil | Descripción | Definición |
|----------------|---|---|
| A | Perfil de roca competente | $V_s \geq 1500$ m/s |
| B | Perfil de roca de rigidez media | 1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s |
| C | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 760 m/s $> V_s \geq 360$ m/s |
| | Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios | $N \geq 50.0$ $S_u \geq 100$ kPa |
| | Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | 360 m/s $> V_s \geq 180$ m/s |
| D | Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones | $50 > N \geq 15.0$ 100 kPa $> S_u \geq 50$ kPa |
| | Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o | $V_s < 180$ m/s |
| E | Perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas | $IP > 20$ $w \geq 40\%$ $S_u < 50$ kPa |

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014)

De acuerdo con la NEC para las zonas por donde fluyen los ríos El Salto y Pita y con los datos de la sísmica de refracción cumplimos con el criterio de velocidad de onda cortante. Para el caso de $V_{s30}=576.95$ m/s se encuentra dentro del rango $760\text{m/s} > V_s \geq 360$ y corresponde al perfil de suelo tipo C, en donde existen perfiles de suelos muy densos o roca blanda. Mientras que para $V_{s30}=905.65$ m/s se encuentra en el rango 1500 m/s $> V_s \geq 760$ m/s y corresponde al perfil de suelo tipo B, en donde hay roca de rigidez media.

4.7.3 Propiedades mecánicas del suelo

4.7.3.1 Contenido de humedad

Para determinar el contenido total de humedad de cada muestra aplicamos la norma INEN 862, que establece el método de ensayo para hallar el porcentaje de humedad evaporable por secado, correspondiente a la humedad superficial y a la humedad contenida en los poros del árido.

Utilizamos cuatro muestras en estado natural, estas fueron secadas en el horno hasta eliminar la humedad tanto superficial como aquella ubicada entre los poros del árido. La cantidad de agua evaporada expresada en porcentaje respecto de la masa seca es la humedad de árido.

$$P = \frac{(W - D)}{D} * 100$$



Figura 74. Ensayo de contenido de humedad

En la siguiente tabla se muestran los respectivos datos y cálculos para cada muestra ensayada.

Tabla 32
Contenido de humedad

| Muestra | Fino | | Grueso | |
|--|-------|-------|--------|-------|
| | M1 | M2 | M3 | M4 |
| Recipiente | M1 | M2 | M3 | M4 |
| Peso del recipiente (g) | 39,4 | 50,1 | 46,5 | 42,7 |
| Peso del recipiente + muestra húmeda (g) | 298,5 | 269,7 | 334,8 | 394,4 |
| Peso del recipiente + muestra seca (g) | 274,8 | 249,6 | 320,3 | 381,9 |
| Peso del agua (g) | 23,7 | 20,1 | 14,5 | 12,5 |
| Peso seco (g) | 235,4 | 199,5 | 273,8 | 339,2 |
| % Agua | 10,1 | 10,1 | 5,3 | 3,7 |
| % Contenido de humedad | 10,1 | | 4,5 | |

4.7.3.2 Densidad

Los ensayos de densidad suelta y densidad varillada se realizaron de acuerdo con la norma INEN 858, ya que especifica el método de ensayo para determinar la masa unitaria (peso volumétrico) del árido, en condición compactada o suelta y posteriormente se calcula los vacíos entre las partículas en los áridos, para estos ensayos utilizamos la mezcla de material fino y grueso obtenida de campo.

Para el ensayo de densidad suelta utilizamos un recipiente cilíndrico de metal con una capacidad adecuada, realizamos el procedimiento por paladas que consistió en llenar el molde a rebosar por medio de un cucharón, de manera que descargamos el árido a una altura de 50 mm con respecto a la parte superior del molde, consecutivamente nivelamos la superficie del árido con una regleta y finalmente determinamos la masa.

En cuanto al ensayo de densidad varillada, se colocó el árido en un recipiente cilíndrico metálico en donde llenamos la tercera parte del molde y nivelamos la superficie con los dedos, con la varilla compactamos la primera capa con 25 golpes en donde se procuró distribuirlos uniformemente, para la segunda y tercera capa realizamos el mismo procedimiento, posteriormente nivelamos la superficie del árido con una regleta y obtenemos la masa.

Los respectivos cálculos fueron realizados con la siguiente ecuación propuesta por la norma INEN 858 y los resultados se presentan a continuación en las tablas.

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

Donde:

- M: Masa unitaria del árido (kg/m³)
- G: Masa del árido más el molde (kg)
- T: Masa del molde (kg)
- V: Volumen del molde (m³)



Figura 75. Ensayo de densidad varillada

Tabla 33

Densidad suelta

| Densidad suelta | | |
|--------------------------------------|---------|---------|
| Molde N° | H1 | H2 |
| Peso del molde (g) | 2096,7 | 2096,7 |
| Peso del molde + suelo (g) | 12565,6 | 12887,5 |
| Peso suelo (g) | 10468,9 | 10790,8 |
| Volumen (cm ³) | 7318,57 | 7318,57 |
| Densidad suelta (g/cm ³) | 1,43 | 1,47 |
| Media | 1,45 | |

Tabla 34**Densidad varillada**

| Densidad varillada | | |
|---|---------|---------|
| Molde N° | H3 | H4 |
| Peso del molde (g) | 2096,7 | 2096,7 |
| Peso del molde + suelo (g) | 14517 | 14507 |
| Peso suelo (g) | 12420,3 | 12410,3 |
| Volumen (cm ³) | 7318,57 | 7318,57 |
| Densidad varillada (g/cm ³) | 1,60 | 1,58 |
| Media | 1,60 | |

4.7.3.3 Peso específico y absorción de agua del agregado grueso

Para hallar el peso específico y absorción de agua del agregado grueso trabajamos con la norma INEN 857.

Sumergimos la muestra por veinte y cuatro horas, de manera de conseguir una masa constante con la finalidad de llenar con agua sus poros, posteriormente retiramos la muestra del agua; con una franela secamos el agua superficial de las partículas y determinamos la masa. Finalmente secamos la muestra en el horno y obtenemos su masa.

**Figura 76. Ensayo de peso específico y absorción del árido grueso**

Los respectivos cálculos con los valores de masas obtenidos y mediante las fórmulas empleadas se encuentran en la siguiente tabla.

Tabla 35

Peso específico y absorción del árido grueso

| Agregado grueso | | |
|------------------|--|---------------------------|
| A | Peso de la muestra saturada con superficie seca | 3831,70 (g) |
| B | Peso en el agua de la muestra saturada | 2259,00 (g) |
| C | Peso de la muestra seca | 3682,70 (g) |
| γ | Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo | 0,99823 |
| $C/(C-B)*\gamma$ | Peso específico del material impermeable de las partículas | 2,58 (g/cm ³) |
| $A/(A-B)*\gamma$ | Peso específico de las partículas saturadas con superficie seca | 2,43 (g/cm ³) |
| $C/(A-B)*\gamma$ | Peso específico de las partículas secas | 2,34 (g/cm ³) |
| $(A-C)/C*100$ | Absorción de agua | 4,05 (%) |

4.7.3.4 Gravedad específica y absorción del agregado fino

Utilizamos la norma INEN 856, puesto que establece el método de ensayo para determinar la gravedad específica y la absorción del árido fino.

Sumergimos en agua la muestra del árido por veinte y cuatro horas, hasta conseguir una masa constante de manera de llenar con agua sus poros. Posteriormente la muestra debe estar saturada superficialmente seca, en este estado determinamos su masa. Para este ensayo utilizamos un picnómetro graduado en donde se colocó el agregado fino, determinamos el volumen de la muestra por el método volumétrico; Finalmente, secamos la muestra en el horno y determinamos nuevamente su masa.



Figura 77. Ensayo de gravedad específica y absorción del árido fino

Tabla 36**Gravedad específica y absorción del árido fino**

| Agregado fino | | | |
|----------------------|---|---------|----------------------|
| A | Peso de la muestra saturada con superficie seca | 500 | (g) |
| C | Peso de la muestra seca | 463,60 | (g) |
| D | Peso del frasco lleno de agua | 655,43 | (g) |
| E | Peso del frasco lleno con la muestra saturada | 944,06 | (g) |
| γ | Peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo | 0,99802 | |
| $C/(C+D-E)*\gamma$ | Peso específico del material impermeable de las partículas | 2,64 | (g/cm ³) |
| $A/(A+D-E)*\gamma$ | Densidad relativa (Gravedad específica) en condición superficie saturado seco | 2,36 | (g/cm ³) |
| $C/(A+D-E)*\gamma$ | Peso específico de las partículas secas | 2,20 | (g/cm ³) |
| $(A-C)/C*100$ | Absorción de agua | 7,85 | (%) |

4.7.3.5 Carga puntual

El ensayo de carga puntual fue realizado con respecto a la norma ASTM D 5731, que establece el método para estimar el valor del índice I_{s50} . Las muestras (rocas) son rotas por la aplicación de una carga concentrada.

Las rocas ensayadas tenían un tamaño comprendido entre 15 mm y 100 mm, fueron ensayadas ocho rocas; estas se colocaron una a una en la máquina de ensayo de un sistema de medida de carga P necesaria para romper la muestra de roca.

**Figura 78. Ensayo de carga puntual**

Tabla 37
Carga puntual

| N° | Peso (g) | Largo (mm) | Diámetro D (mm) | Relación (L/D) | Carga (N) | D ² (mm ²) | Is=C/D ² (Mpa) | F=(D/50) ^{0,45} | Is ₍₅₀₎ | Co=22*Is ₍₅₀₎ |
|----|----------|------------|-----------------|----------------|-----------|-----------------------------------|---------------------------|--------------------------|--|--------------------------|
| 1 | 1293,18 | 145,20 | 71,20 | 2,04 | 15329,76 | 5069,44 | 3,02 | 1,17 | 3,55 | 78,00 |
| 2 | 988,89 | 87,60 | 66,20 | 1,32 | 26458,34 | 4382,44 | 6,04 | 1,13 | 6,85 | 150,70 |
| 3 | 1036,02 | 148,60 | 62,40 | 2,38 | 28288,26 | 3893,76 | 7,27 | 1,10 | 8,03 | 176,59 |
| 4 | 607,19 | 115,20 | 65,10 | 1,77 | 11628,73 | 4238,01 | 2,74 | 1,13 | 3,09 | 67,98 |
| 5 | 538,14 | 110,20 | 70,40 | 1,57 | 12619,20 | 4956,16 | 2,55 | 1,17 | 2,97 | 65,34 |
| 6 | 1216,84 | 136,20 | 67,00 | 2,03 | 26028,81 | 4489,00 | 5,80 | 1,14 | 6,61 | 145,52 |
| 7 | 472,29 | 115,20 | 55,10 | 2,09 | 16369,26 | 3036,01 | 5,39 | 1,04 | 5,63 | 123,92 |
| 8 | 705,60 | 149,80 | 50,20 | 2,98 | 19838,85 | 2520,04 | 7,87 | 1,00 | 7,89 | 173,50 |
| | | | | | | | | | Resistencia de la roca (Kg/cm ²) | 1226,93 |

4.7.3.6 Corte directo

Para el ensayo de corte directo aplicamos la norma ASTM D3080 bajo condiciones consolidadas drenadas.

Realizamos tres ensayos con diferente carga, el procedimiento consistió en colocar la muestra de suelo en el dispositivo de corte directo, aplicamos una fuerza normal, humedecemos la muestra y finalmente se ejecutamos el mismo procedimiento para los otros especímenes.

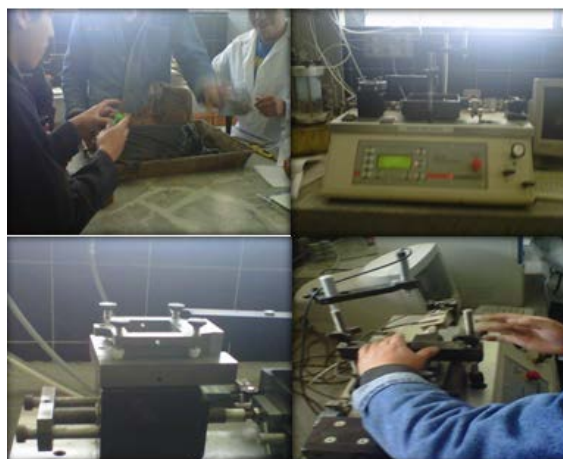


Figura 79. Ensayo de corte directo

Área de la muestra = 25 cm²

Tabla 38

Corte directo para carga de 50 MPa

| Carga (kN) | Horz (mm) | Vert (mm) | Esfuerzo corte (Kg/cm ²) |
|------------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,001 | 0,050 | -0,003 | 0,004 |
| 0,028 | 0,100 | -0,003 | 0,114 |
| 0,057 | 0,160 | -0,010 | 0,233 |
| 0,082 | 0,230 | -0,019 | 0,335 |
| 0,104 | 0,300 | -0,031 | 0,424 |
| 0,123 | 0,360 | -0,042 | 0,502 |
| 0,139 | 0,430 | -0,050 | 0,567 |
| 0,154 | 0,500 | -0,058 | 0,629 |
| 0,168 | 0,570 | -0,066 | 0,686 |
| 0,180 | 0,650 | -0,073 | 0,735 |
| 0,192 | 0,720 | -0,081 | 0,784 |
| 0,199 | 0,800 | -0,089 | 0,812 |
| 0,206 | 0,870 | -0,095 | 0,841 |
| 0,213 | 0,950 | -0,102 | 0,869 |
| 0,216 | 1,020 | -0,109 | 0,882 |
| 0,209 | 1,100 | -0,117 | 0,853 |
| 0,208 | 1,170 | -0,123 | 0,849 |
| 0,205 | 1,250 | -0,127 | 0,837 |
| 0,202 | 1,320 | -0,130 | 0,824 |
| 0,196 | 1,400 | -0,133 | 0,800 |
| 0,192 | 1,480 | -0,137 | 0,784 |
| 0,192 | 1,560 | -0,140 | 0,784 |
| 0,189 | 1,630 | -0,142 | 0,771 |
| 0,182 | 1,700 | -0,143 | 0,743 |
| 0,176 | 1,780 | -0,145 | 0,718 |
| 0,170 | 1,850 | -0,149 | 0,694 |
| 0,165 | 1,920 | -0,149 | 0,673 |
| 0,163 | 1,990 | -0,149 | 0,665 |
| 0,164 | 2,070 | -0,150 | 0,669 |
| 0,165 | 2,140 | -0,151 | 0,673 |

Tabla 39

Corte directo para carga de 100 MPa

| Carga (kN) | Horz (mm) | Vert (mm) | Esfuerzo corte (Kg/cm ²) |
|------------|-----------|-----------|--------------------------------------|
| 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,049 | 0,060 | -0,020 | 0,200 |
| 0,078 | 0,130 | -0,041 | 0,318 |

CONTINÚA 

| | | | |
|-------|-------|--------|-------|
| 0,110 | 0,200 | -0,063 | 0,449 |
| 0,139 | 0,270 | -0,082 | 0,567 |
| 0,165 | 0,350 | -0,101 | 0,673 |
| 0,190 | 0,420 | -0,119 | 0,776 |
| 0,210 | 0,490 | -0,134 | 0,857 |
| 0,227 | 0,570 | -0,151 | 0,927 |
| 0,246 | 0,650 | -0,164 | 1,004 |
| 0,270 | 0,720 | -0,178 | 1,102 |
| 0,289 | 0,790 | -0,193 | 1,180 |
| 0,305 | 0,870 | -0,206 | 1,245 |
| 0,321 | 0,950 | -0,216 | 1,310 |
| 0,334 | 1,030 | -0,228 | 1,363 |
| 0,351 | 1,100 | -0,237 | 1,433 |
| 0,365 | 1,180 | -0,245 | 1,490 |
| 0,378 | 1,260 | -0,251 | 1,543 |
| 0,391 | 1,330 | -0,256 | 1,596 |
| 0,403 | 1,410 | -0,261 | 1,645 |
| 0,412 | 1,480 | -0,265 | 1,682 |
| 0,423 | 1,560 | -0,270 | 1,727 |
| 0,435 | 1,630 | -0,276 | 1,776 |
| 0,450 | 1,700 | -0,281 | 1,837 |
| 0,460 | 1,780 | -0,285 | 1,878 |
| 0,472 | 1,850 | -0,291 | 1,927 |
| 0,483 | 1,930 | -0,296 | 1,971 |
| 0,493 | 2,000 | -0,315 | 2,012 |
| 0,502 | 2,080 | -0,322 | 2,049 |
| 0,514 | 2,160 | -0,327 | 2,098 |
| 0,523 | 2,240 | -0,334 | 2,135 |

Tabla 40

Corte directo para carga de 150 MPa

| Carga (kN) | Horz (mm) | Vert (mm) | Esfuerzo corte (Kg/cm ²) |
|---------------|--------------|--------------|--|
| 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 0,082 | 0,050 | -0,031 | 0,335 |
| 0,142 | 0,110 | -0,044 | 0,580 |
| 0,203 | 0,170 | -0,063 | 0,829 |
| 0,263 | 0,240 | -0,081 | 1,073 |
| 0,310 | 0,310 | -0,100 | 1,265 |
| 0,354 | 0,380 | -0,119 | 1,445 |
| 0,395 | 0,460 | -0,135 | 1,612 |
| 0,426 | 0,530 | -0,152 | 1,739 |
| 0,461 | 0,600 | -0,169 | 1,882 |
| 0,490 | 0,680 | -0,182 | 2,000 |
| 0,515 | 0,750 | -0,195 | 2,102 |
| 0,541 | 0,820 | -0,205 | 2,208 |
| 0,567 | 0,900 | -0,216 | 2,314 |
| 0,585 | 0,970 | -0,225 | 2,388 |

CONTINÚA 

| | | | |
|-------|-------|--------|-------|
| 0,608 | 1,040 | -0,234 | 2,482 |
| 0,624 | 1,120 | -0,244 | 2,547 |
| 0,654 | 1,190 | -0,253 | 2,669 |
| 0,684 | 1,260 | -0,262 | 2,792 |
| 0,712 | 1,340 | -0,271 | 2,906 |
| 0,741 | 1,410 | -0,279 | 3,024 |
| 0,768 | 1,490 | -0,287 | 3,135 |
| 0,796 | 1,560 | -0,294 | 3,249 |
| 0,823 | 1,630 | -0,301 | 3,359 |
| 0,846 | 1,710 | -0,309 | 3,453 |
| 0,872 | 1,780 | -0,315 | 3,559 |
| 0,896 | 1,860 | -0,322 | 3,657 |
| 0,921 | 1,930 | -0,327 | 3,759 |
| 0,940 | 2,010 | -0,333 | 3,837 |
| 0,958 | 2,090 | -0,340 | 3,910 |
| 0,981 | 2,160 | -0,345 | 4,004 |

Ángulo de fricción interna = 42°

Cohesión = 0

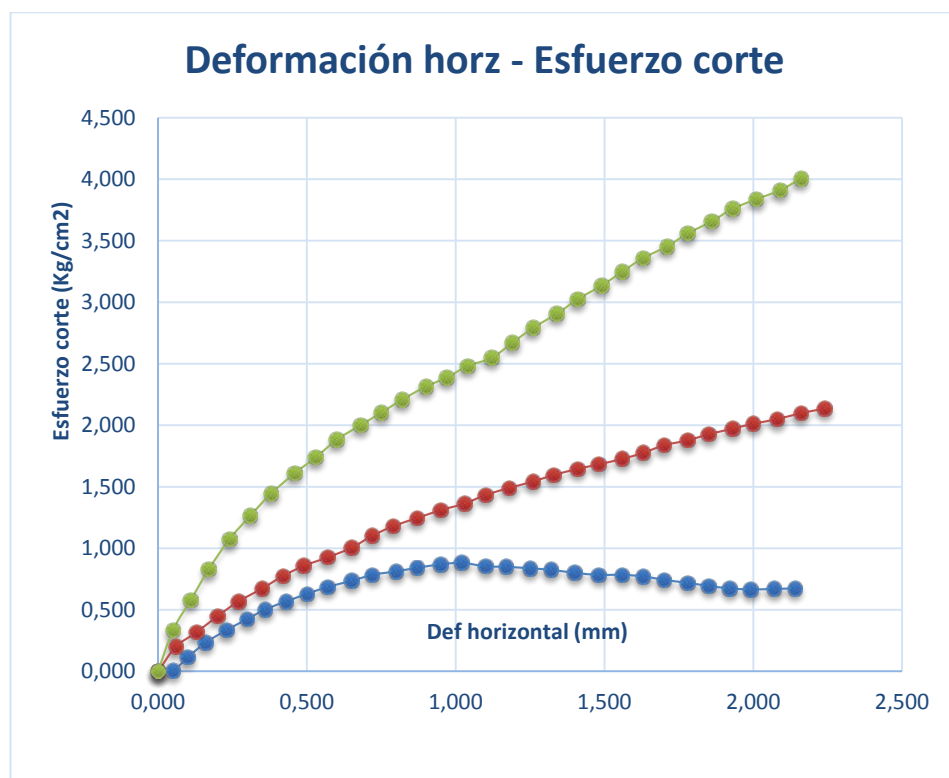


Figura 80. Deformación horizontal vs. Esfuerzo de corte

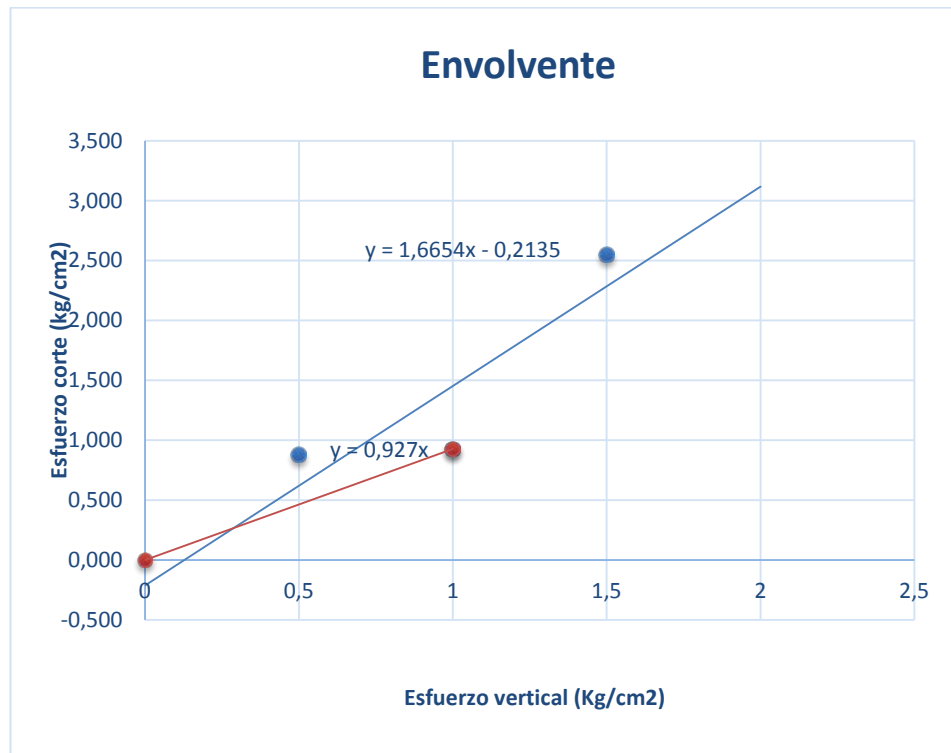


Figura 81. Envolvente

CAPÍTULO 5

DISEÑO DE LAS PRESAS MIXTAS

El diseño que se ha considerado es de una presa mixta (hormigón y materiales sueltos), puesto que de esta manera se cumple con las condiciones de estabilidad al deslizamiento y volcamiento, con respecto a estas condiciones hemos tomado de referencia a la presa mixta ubicada en Almaty, Kazajistán.

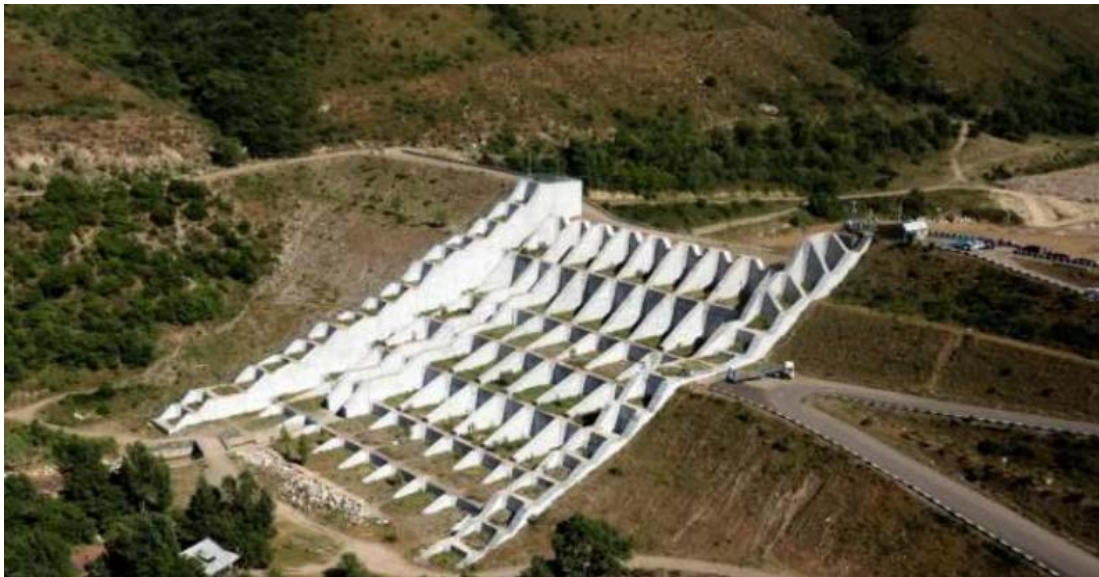


Figura 82. Presa mixta (Almaty, Kazajistán)

Fuente: (Sandoval W. , Obras de mitigación del flujo de lahares del Cotopaxi, 2016)

Para realizar el análisis de la presa mixta en cuanto al peso, fuerzas y momentos se ha tomado en cuenta como la parte de hormigón a la pantalla, paredes y contrafuerte y la parte de materiales sueltos al relleno de tierra.

Los resultados se muestran a continuación.

5.1 Presa mixta del río El Salto

5.1.1 Estabilidad de la presa

Para realizar todos los cálculos concernientes a la estabilidad de la presa mixta hemos considerado la siguiente franja.

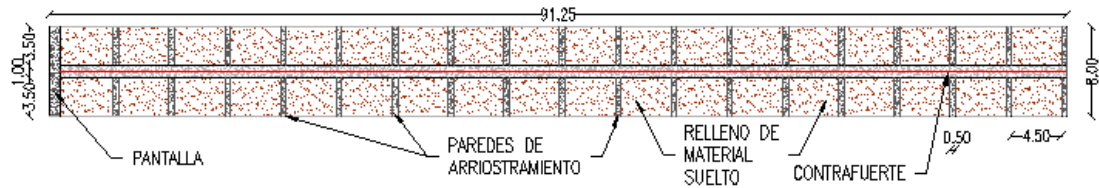


Figura 83. Franja de diseño

5.1.1.1 Factor de seguridad volcamiento

5.1.1.1.1 Momento estabilizador

$$f'c = 2,40 T/m^3$$

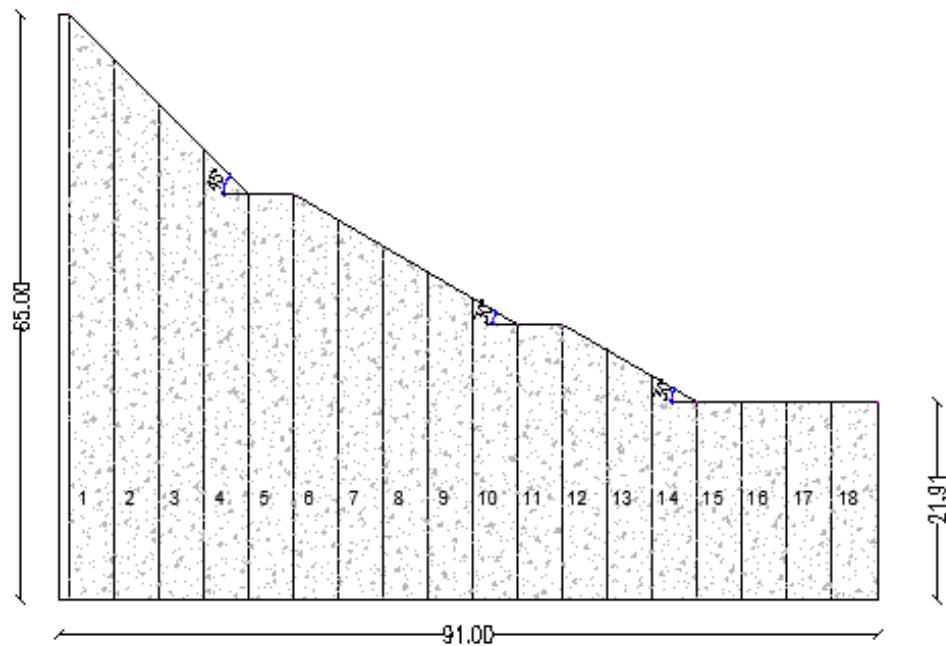


Figura 84. Geometría del contrafuerte

Tabla 41

Momento estabilizador para el contrafuerte

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | Espesor (m) | V1 (m³) | V2 (m³) | Carga1 (T) | Carga2 (T) | Brazo1 (m) | Brazo2 (m) | Me (T.m) |
|----|--------|-------|-------|-------|-------------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 1 | 45 | 65 | 5 | 60,00 | 1 | 300,00 | 12,50 | 720,00 | 30,00 | 87,50 | 88,33 | 65650,00 |
| 2 | 45 | 60,00 | 5 | 55,00 | 1 | 275,00 | 12,50 | 660,00 | 30,00 | 82,50 | 83,33 | 56950,00 |
| 3 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 1 | 250,00 | 12,50 | 600,00 | 30,00 | 77,50 | 78,33 | 48850,00 |
| 4 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 1 | 225,00 | 12,50 | 540,00 | 30,00 | 72,50 | 73,33 | 41350,00 |
| 5 | 0 | 45,00 | 5 | 45,00 | 1 | 225,00 | 0,00 | 540,00 | 0,00 | 67,50 | 68,33 | 36450,00 |
| 6 | 30 | 45,00 | 5 | 42,11 | 1 | 210,57 | 7,22 | 505,36 | 17,32 | 62,50 | 63,33 | 32681,90 |
| 7 | 30 | 42,11 | 5 | 39,23 | 1 | 196,13 | 7,22 | 470,72 | 17,32 | 57,50 | 58,33 | 28076,65 |
| 8 | 30 | 39,23 | 5 | 36,34 | 1 | 181,70 | 7,22 | 436,08 | 17,32 | 52,50 | 53,33 | 23817,80 |
| 9 | 30 | 36,34 | 5 | 33,45 | 1 | 167,26 | 7,22 | 401,44 | 17,32 | 47,50 | 48,33 | 19905,36 |
| 10 | 30 | 33,45 | 5 | 30,57 | 1 | 152,83 | 7,22 | 366,79 | 17,32 | 42,50 | 43,33 | 16339,34 |
| 11 | 0 | 30,57 | 5 | 30,57 | 1 | 152,83 | 0,00 | 366,79 | 0,00 | 37,50 | 38,33 | 13754,81 |
| 12 | 30 | 30,57 | 5 | 27,68 | 1 | 138,40 | 7,22 | 332,15 | 17,32 | 32,50 | 33,33 | 11372,35 |
| 13 | 30 | 27,68 | 5 | 24,79 | 1 | 123,96 | 7,22 | 297,51 | 17,32 | 27,50 | 28,33 | 9524,02 |
| 14 | 30 | 24,79 | 5 | 21,91 | 1 | 109,53 | 7,22 | 262,87 | 17,32 | 22,50 | 23,33 | 8116,84 |
| 15 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 1 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 7,50 | 8,33 | 1971,54 |
| 16 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 1 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 12,50 | 13,33 | 3285,90 |
| 17 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 1 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 7,50 | 8,33 | 1971,54 |
| 18 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 1 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 2,50 | 3,33 | 657,18 |
| | | | | | | 3146,34 | 107,74 | 7551,21 | 258,56 | | | 412125,23 |

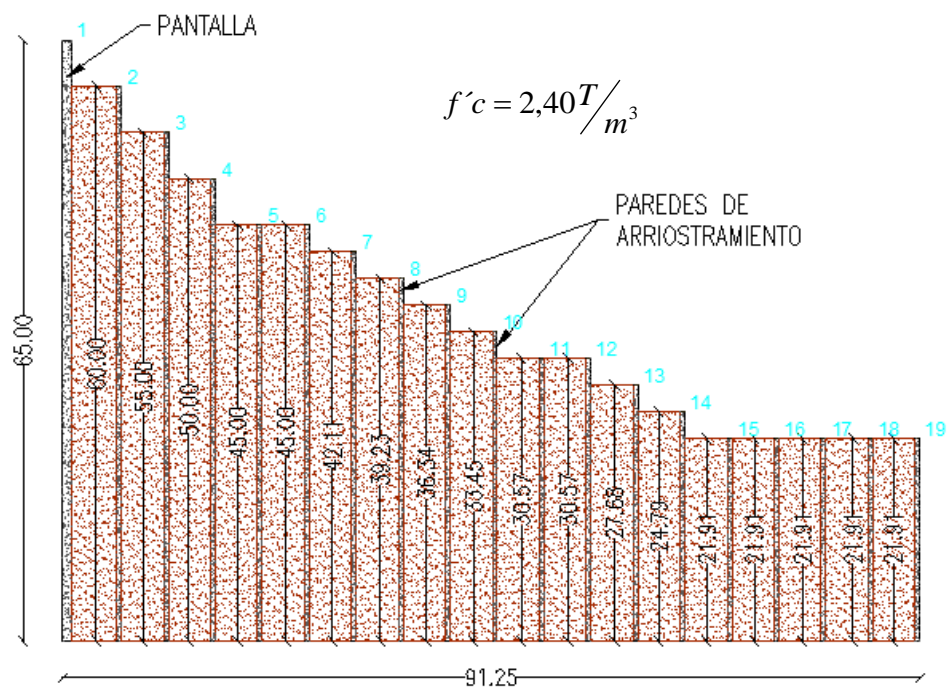


Figura 85. Pantalla y paredes de arriostramiento

Tabla 42

Momento estabilizador para la pantalla y las paredes de arriostramiento

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | Espesor (m) | V (m ³) | Carga (T) | Brazo (m) | Me (T.m) |
|----|--------|----------|----------|----------|----------------|------------------------|--------------|--------------|-------------|
| 1 | 45 | 65,00 | 5 | 60,00 | 1 | 520,00 | 1248,00 | 90,5 | 112944,00 |
| 2 | 45 | 60,00 | 5 | 55,00 | 0,5 | 240,00 | 576,00 | 90 | 51840,00 |
| 3 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 0,5 | 220,00 | 528,00 | 85 | 44880,00 |
| 4 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 0,5 | 200,00 | 480,00 | 80 | 38400,00 |
| 5 | 0 | 45,00 | 5 | 45,00 | 0,5 | 180,00 | 432,00 | 75 | 32400,00 |
| 6 | 30 | 45,00 | 5 | 42,11 | 0,5 | 180,00 | 432,00 | 70 | 30240,00 |
| 7 | 30 | 42,11 | 5 | 39,23 | 0,5 | 168,45 | 404,29 | 65 | 26278,67 |
| 8 | 30 | 39,23 | 5 | 36,34 | 0,5 | 156,91 | 376,57 | 60 | 22594,46 |
| 9 | 30 | 36,34 | 5 | 33,45 | 0,5 | 145,36 | 348,86 | 55 | 19187,39 |
| 10 | 30 | 33,45 | 5 | 30,57 | 0,5 | 133,81 | 321,15 | 50 | 16057,44 |
| 11 | 0 | 30,57 | 5 | 30,57 | 0,5 | 122,26 | 293,44 | 45 | 13204,62 |
| 12 | 30 | 30,57 | 5 | 27,68 | 0,5 | 122,26 | 293,44 | 40 | 11737,44 |
| 13 | 30 | 27,68 | 5 | 24,79 | 0,5 | 110,72 | 265,72 | 35 | 9300,31 |
| 14 | 30 | 24,79 | 5 | 21,91 | 0,5 | 99,17 | 238,01 | 30 | 7140,31 |
| 15 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 25 | 5257,44 |
| 16 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 20 | 4205,95 |
| 17 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 15 | 3154,46 |
| 18 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 10 | 2102,97 |
| 19 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 5 | 1051,49 |
| | | | | | | 3037,07 | 7288,96 | | |
| | | | | | | | | 451976,94 | |

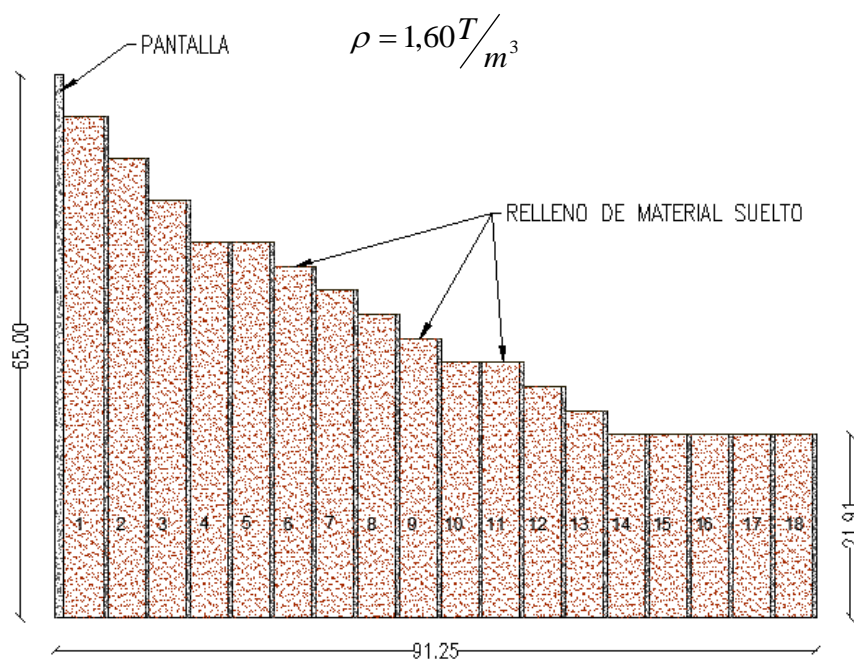


Figura 86. Relleno de material suelto (Suelo)

Tabla 43**Momento estabilizador para el relleno de material suelto**

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | d (m) | V (m ³) | Carga (T) | Brazo (m) | Me (T.m) |
|----|--------|----------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------|--------------|-------------------|
| 1 | 45 | 65 | 5 | 60,00 | 4,75 | 1995,00 | 3192,00 | 87,50 | 279300,00 |
| 2 | 45 | 60,00 | 5 | 55,00 | 4,5 | 1732,50 | 2772,00 | 82,50 | 228690,00 |
| 3 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 4,5 | 1575,00 | 2520,00 | 77,50 | 195300,00 |
| 4 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 4,5 | 1417,50 | 2268,00 | 72,50 | 164430,00 |
| 5 | 0 | 45,00 | 5 | 45,00 | 4,5 | 1417,50 | 2268,00 | 67,50 | 153090,00 |
| 6 | 30 | 45,00 | 5 | 42,11 | 4,5 | 1326,57 | 2122,51 | 62,50 | 132656,73 |
| 7 | 30 | 42,11 | 5 | 39,23 | 4,5 | 1235,63 | 1977,02 | 57,50 | 113678,39 |
| 8 | 30 | 39,23 | 5 | 36,34 | 4,5 | 1144,70 | 1831,52 | 52,50 | 96154,97 |
| 9 | 30 | 36,34 | 5 | 33,45 | 4,5 | 1053,77 | 1686,03 | 47,50 | 80086,47 |
| 10 | 30 | 33,45 | 5 | 30,57 | 4,5 | 962,84 | 1540,54 | 42,50 | 65472,89 |
| 11 | 0 | 30,57 | 5 | 30,57 | 4,5 | 962,84 | 1540,54 | 37,50 | 57770,20 |
| 12 | 30 | 30,57 | 5 | 27,68 | 4,5 | 871,90 | 1395,05 | 32,50 | 45339,01 |
| 13 | 30 | 27,68 | 5 | 24,79 | 4,5 | 780,97 | 1249,55 | 27,50 | 34362,74 |
| 14 | 30 | 24,79 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 22,50 | 24841,39 |
| 15 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 17,50 | 19321,08 |
| 16 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 12,50 | 13800,77 |
| 17 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 7,50 | 8280,46 |
| 18 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 2,50 | 2760,15 |
| | | | | | | <u>19926,92</u> | <u>31883,06</u> | | <u>1715335,26</u> |

Tabla 44**Momento estabilizador**

| Elemento | Carga (T) | Momento (T.m) |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Contrafuerte | 7809,77 | 412125,23 |
| Pantalla y paredes de arriostamiento | 7288,96 | 451976,94 |
| Relleno de material suelto | 31883,06 | 1715335,26 |
| | <u>46981,80</u> | <u>2579437,43</u> |

5.1.1.1.2 Momento volcador

Para hallar el empuje del lahar hemos considerado un ángulo de fricción interna de 42° que fue calculado en el ensayo de corte directo y un peso específico de 2,20 T/m³.

Con respecto al empuje que genera el lahar sobre la presa mixta se utiliza la ecuación de presión activa de tierra de Rankine, debido a que su comportamiento se asimila al empuje de sedimentos.

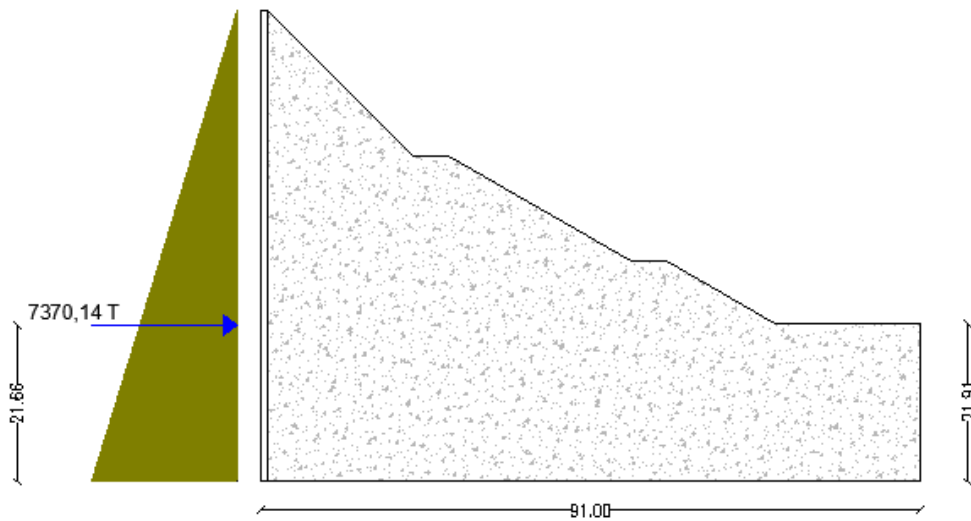


Figura 87. Empuje del lahar

$$Ka = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi}$$

$$Ka = \frac{1 - \text{sen}(42)}{1 + \text{sen}(42)}$$

$$Ka = 0,1982$$

$$E = \frac{1}{2} * Ka * \gamma * H^2$$

Tabla 45

Momento volcador

| H(m) | E (T) | Mv (T.m) |
|------|---------|-----------|
| 65 | 7370,14 | 159686,34 |

5.1.1.1.3 Factor de seguridad volcamiento

$$F_{sv} = \frac{M_e}{M_v}$$

$$F_{sv} = \frac{2579437,43}{159686,34}$$

$$F_{sv} = 16,15 > 1,5$$

5.1.1.2 Esfuerzos y factor de seguridad al deslizamiento

Tabla 46

Momento centro base para el contrafuerte

| N° | V1 (m ³) | V2 (m ³) | Carga1 (T) | Carga2 (T) | BrazoX1 (m) | BrazoX2 (m) | BrazoY1 (m) | BrazoY2 (m) | Mx (T.m) | My (T.m) |
|----|-------------------------|-------------------------|----------------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|------------------|
| 1 | 300,00 | 12,50 | 720,00 | 30,00 | 42 | 42,83 | 30,00 | 61,67 | 31525,00 | 23450,00 |
| 2 | 275,00 | 12,50 | 660,00 | 30,00 | 37 | 37,83 | 27,50 | 56,67 | 25555,00 | 19850,00 |
| 3 | 250,00 | 12,50 | 600,00 | 30,00 | 32 | 32,83 | 25,00 | 51,67 | 20185,00 | 16550,00 |
| 4 | 225,00 | 12,50 | 540,00 | 30,00 | 27 | 27,83 | 22,50 | 46,67 | 15415,00 | 13550,00 |
| 5 | 225,00 | 0,00 | 540,00 | 0,00 | 22 | 22,83 | 22,50 | 45,00 | 11880,00 | 12150,00 |
| 6 | 210,57 | 7,22 | 505,36 | 17,32 | 17 | 17,83 | 21,06 | 43,08 | 8899,99 | 11387,24 |
| 7 | 196,13 | 7,22 | 470,72 | 17,32 | 12 | 12,83 | 19,61 | 40,19 | 5870,90 | 9928,40 |
| 8 | 181,70 | 7,22 | 436,08 | 17,32 | 7 | 7,83 | 18,17 | 37,30 | 3188,22 | 8569,55 |
| 9 | 167,26 | 7,22 | 401,44 | 17,32 | 2 | 2,83 | 16,73 | 34,42 | 851,95 | 7310,71 |
| 10 | 152,83 | 7,22 | 366,79 | 17,32 | 3 | 2,17 | 15,28 | 31,53 | 1137,91 | 6151,86 |
| 11 | 152,83 | 0,00 | 366,79 | 0,00 | 8 | 7,17 | 15,28 | 30,57 | 2934,36 | 5605,77 |
| 12 | 138,40 | 7,22 | 332,15 | 17,32 | 13 | 12,17 | 13,84 | 28,64 | 4528,73 | 5093,02 |
| 13 | 123,96 | 7,22 | 297,51 | 17,32 | 18 | 17,17 | 12,40 | 25,75 | 5652,57 | 4134,17 |
| 14 | 109,53 | 7,22 | 262,87 | 17,32 | 23 | 22,17 | 10,95 | 22,87 | 6429,99 | 3275,32 |
| 15 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 28 | 27,17 | 10,95 | 21,91 | 7360,41 | 2879,23 |
| 16 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 33 | 32,17 | 10,95 | 21,91 | 8674,77 | 2879,23 |
| 17 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 38 | 37,17 | 10,95 | 21,91 | 9989,13 | 2879,23 |
| 18 | 109,53 | 0,00 | 262,87 | 0,00 | 43 | 42,17 | 10,95 | 21,91 | 11303,49 | 2879,23 |
| | <u>3146,34</u> | <u>107,74</u> | <u>7551,21</u> | <u>258,56</u> | | | | | <u>181382,41</u> | <u>158522,98</u> |

Tabla 47

Momento centro base para la pantalla y las paredes de arriostramiento

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | Espesor (m) | V (m ³) | Carga (T) | BrazoX (m) | BrazoY (m) | Mx (T.m) | My (T.m) | |
|----|--------|-------|-------|-------|-------------|---------------------|-----------|------------|------------|----------|-----------|-----------|
| 1 | 45 | 65 | 5 | 60,00 | 1 | 520,00 | 1248,00 | 45 | 32,50 | 56160,00 | 40560,00 | |
| 2 | 45 | 60,00 | 5 | 55,00 | 0,5 | 240,00 | 576,00 | 39,5 | 30,00 | 22752,00 | 17280,00 | |
| 3 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 0,5 | 220,00 | 528,00 | 34,5 | 27,50 | 18216,00 | 14520,00 | |
| 4 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 0,5 | 200,00 | 480,00 | 29,5 | 25,00 | 14160,00 | 12000,00 | |
| 5 | 0 | 45,00 | 5 | 45,00 | 0,5 | 180,00 | 432,00 | 24,5 | 22,50 | 10584,00 | 9720,00 | |
| 6 | 30 | 45,00 | 5 | 42,11 | 0,5 | 180,00 | 432,00 | 19,5 | 22,50 | 8424,00 | 9720,00 | |
| 7 | 30 | 42,11 | 5 | 39,23 | 0,5 | 168,45 | 404,29 | 14,5 | 21,06 | 5862,16 | 8512,92 | |
| 8 | 30 | 39,23 | 5 | 36,34 | 0,5 | 156,91 | 376,57 | 9,5 | 19,61 | 3577,46 | 7385,85 | |
| 9 | 30 | 36,34 | 5 | 33,45 | 0,5 | 145,36 | 348,86 | 4,5 | 18,17 | 1569,88 | 6338,77 | |
| 10 | 30 | 33,45 | 5 | 30,57 | 0,5 | 133,81 | 321,15 | 0,5 | 16,73 | 160,57 | 5371,69 | |
| 11 | 0 | 30,57 | 5 | 30,57 | 0,5 | 122,26 | 293,44 | 5,5 | 15,28 | 1613,90 | 4484,62 | |
| 12 | 30 | 30,57 | 5 | 27,68 | 0,5 | 122,26 | 293,44 | 10,5 | 15,28 | 3081,08 | 4484,62 | |
| 13 | 30 | 27,68 | 5 | 24,79 | 0,5 | 110,72 | 265,72 | 15,5 | 13,84 | 4118,71 | 3677,54 | |
| 14 | 30 | 24,79 | 5 | 21,91 | 0,5 | 99,17 | 238,01 | 10,5 | 12,40 | 2499,11 | 2950,46 | |
| 15 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 15,5 | 10,95 | 3259,61 | 2303,39 | |
| 16 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 30,5 | 10,95 | 6414,07 | 2303,39 | |
| 17 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 35,5 | 10,95 | 7465,56 | 2303,39 | |
| 18 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 40,5 | 10,95 | 8517,05 | 2303,39 | |
| 19 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 0,5 | 87,62 | 210,30 | 45,5 | 10,95 | 9568,54 | 2303,39 | |
| | | | | | | | 3037,07 | 7288,96 | | | 188003,69 | 158523,41 |

Tabla 48

Momento centro base para el relleno de materiales sueltos

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | d (m) | V (m ³) | Carga (T) | BrazoX (m) | BrazoY (m) | Mx (T.m) | My (T.m) |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-----------|------------|------------|-----------|----------|
| 1 | 45 | 65 | 5 | 60,00 | 4,75 | 1995,00 | 3192,00 | 42 | 30,00 | 134064,00 | 95760,00 |
| 2 | 45 | 60,00 | 5 | 55,00 | 4,5 | 1732,50 | 2772,00 | 37 | 27,50 | 102564,00 | 76230,00 |
| 3 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 4,5 | 1575,00 | 2520,00 | 32 | 25,00 | 80640,00 | 63000,00 |
| 4 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 4,5 | 1417,50 | 2268,00 | 27 | 22,50 | 61236,00 | 51030,00 |
| 5 | 0 | 45,00 | 5 | 45,00 | 4,5 | 1417,50 | 2268,00 | 22 | 22,50 | 49896,00 | 51030,00 |
| 6 | 30 | 45,00 | 5 | 42,11 | 4,5 | 1326,57 | 2122,51 | 17 | 21,06 | 36082,63 | 44692,85 |
| 7 | 30 | 42,11 | 5 | 39,23 | 4,5 | 1235,63 | 1977,02 | 12 | 19,61 | 23724,19 | 38775,70 |
| 8 | 30 | 39,23 | 5 | 36,34 | 4,5 | 1144,70 | 1831,52 | 7 | 18,17 | 12820,66 | 33278,54 |
| 9 | 30 | 36,34 | 5 | 33,45 | 4,5 | 1053,77 | 1686,03 | 2 | 16,73 | 3372,06 | 28201,39 |
| 10 | 30 | 33,45 | 5 | 30,57 | 4,5 | 962,84 | 1540,54 | 3 | 15,28 | 4621,62 | 23544,24 |
| 11 | 0 | 30,57 | 5 | 30,57 | 4,5 | 962,84 | 1540,54 | 8 | 15,28 | 12324,31 | 23544,24 |
| 12 | 30 | 30,57 | 5 | 27,68 | 4,5 | 871,90 | 1395,05 | 13 | 13,84 | 18135,60 | 19307,09 |

CONTINÚA 

| | | | | | | | | | | | |
|----|----|-------|---|-------|-----|----------|----------|----|-------|-----------|-----------|
| 13 | 30 | 27,68 | 5 | 24,79 | 4,5 | 780,97 | 1249,55 | 18 | 12,40 | 22491,97 | 15489,94 |
| 14 | 30 | 24,79 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 23 | 10,95 | 25393,42 | 12092,78 |
| 15 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 28 | 10,95 | 30913,73 | 12092,78 |
| 16 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 33 | 10,95 | 36434,04 | 12092,78 |
| 17 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 38 | 10,95 | 41954,35 | 12092,78 |
| 18 | 0 | 21,91 | 5 | 21,91 | 4,5 | 690,04 | 1104,06 | 43 | 10,95 | 47474,66 | 12092,78 |
| | | | | | | 19926,92 | 31883,06 | | | 744143,25 | 624347,90 |

Tabla 49

Momento centro base

| Elemento | Carga (T) | Momento X (T.m) | Momento Y (T.m) |
|---------------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|
| Contrafuerte | 7809,77 | 181382,41 | 158522,98 |
| Pantalla y paredes de arriostramiento | 7288,96 | 188003,69 | 158523,41 |
| Relleno de material suelto | 31883,06 | 744143,25 | 624347,90 |
| | 46981,80 | 1113529,36 | 941394,29 |

5.1.1.2.1 Fuerzas sísmicas

Se añaden la fuerza horizontal (Sh) que incrementa el resultado del empuje del lahar y la fuerza vertical (Sv) que reduce la fuerza resistente de la estructura (Peso).

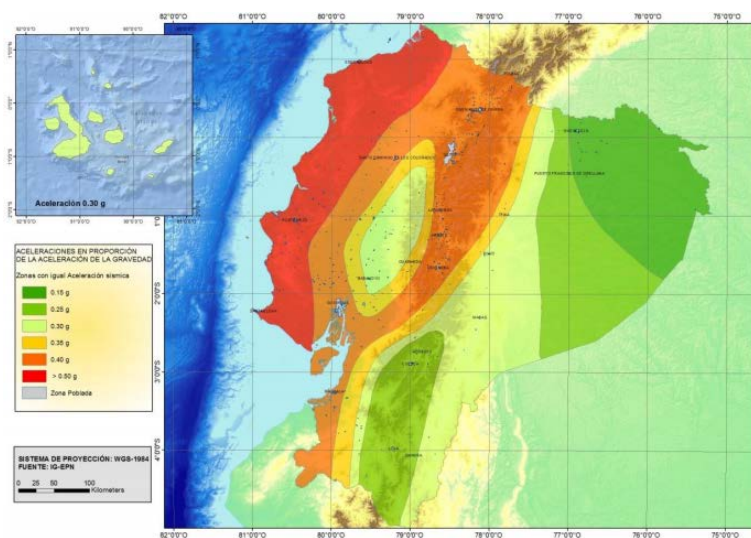


Figura 88. Zonas sísmicas y valor del factor de zona z (Ecuador)

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014)

Tabla 50**Valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada**

| Zona sísmica | I | II | III | IV | V | VI |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|------|----------|
| Valor factor Z | 0.15 | 0.25 | 0.30 | 0.35 | 0.40 | ≥ 0.50 |
| Caracterización del peligro sísmico | Intermedia | Alta | Alta | Alta | Alta | Muy alta |

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014)

Con respecto a la zona sísmica en donde se van a colocar las presas mixtas se obtiene un factor de zona de $z=0.4$, que representa la aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño.

$$Sh = G * \alpha h$$

$$\alpha h = \frac{z}{1 + 3z}$$

$$Sv = G * \alpha v$$

$$\alpha v = \frac{2}{3} \alpha h$$

Donde:

- G: Peso total de la presa.
- αh : Coeficiente sísmico horizontal.
- αv : Coeficiente sísmico horizontal.

$$\alpha h = \frac{0.4}{1 + 3 * 0.4} = 0.18$$

$$Sh = 46981.80T * 0.18 = 8456.72T$$

$$\alpha v = \frac{2}{3} * 0.18 = 0.12$$

$$Sv = 46981.80T * 0.12 = 5637.82T$$

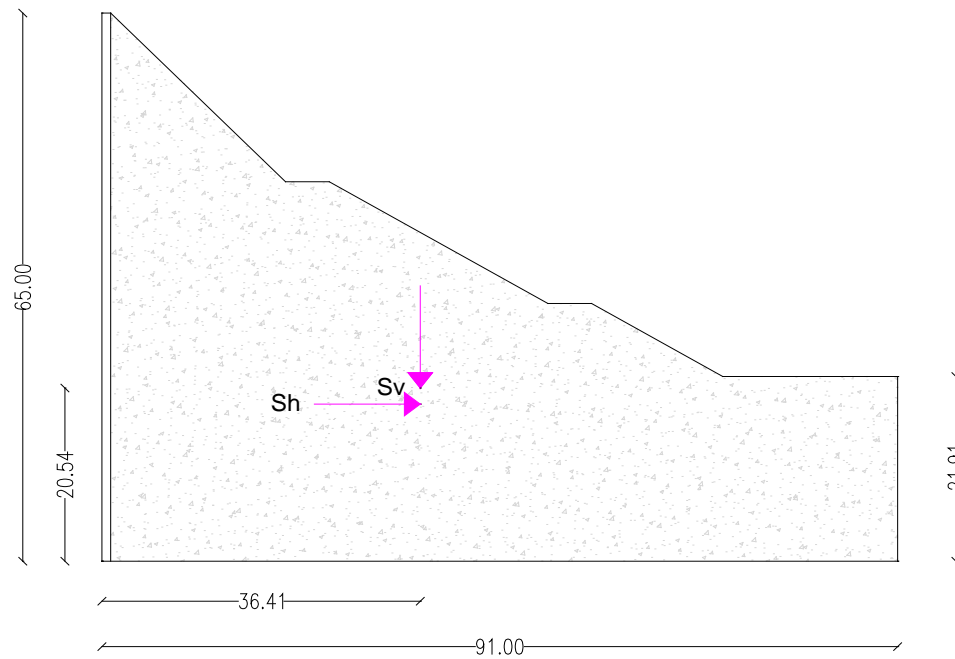


Figura 89. Fuerzas sísmicas

Centro de gravedad

El centro de gravedad se halló en el software Autocad.

$$x = 36.41 \text{ m}$$

$$y = 20.54 \text{ m}$$

```

----- REGIONS -----
Area:                3319.0708
Perimeter:           283.3783
Bounding box:        X: 0.0000 -- 91.0000
                    Y: 0.0000 -- 65.0000
Centroid:            X: 36.4137
                    Y: 20.5370
Moments of inertia:  X: 2065563.5624
                    Y: 6571741.6835
Product of inertia:  XY: 1926935.4948
Radii of gyration:   X: 24.9466
                    Y: 44.4971
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 483074.0650 along [0.9499 -0.3125]
                    J: 2353414.8680 along [0.3125 0.9499]

```

Figura 90. Centro de gravedad de AutoCAD

5.1.1.2.2 Fuerzas con lahar

Tabla 51

Fuerzas y momento de la presa para el río El Salto considerando lahar

| Fuerzas | Fh (T) | Fv (T) | Momento (T.m) |
|----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| E | 7370,14 | 0 | -159686,34 |
| Sv | 0 | -5637,82 | |
| Sh | 8456,72 | 0 | |
| Presa | | 46981,80 | 426890,72 |
| Σ | 15826,86 | 41343,98 | 267204,38 |

Tabla 52

Esfuerzos presa llena

| σ_{y1} | σ_{y2} |
|---------------------------|---------------------------|
| 80991,56kg/m ² | 32590,81kg/m ² |
| 80,99T/m ² | 32,59T/m ² |

5.1.1.2.3 Fuerzas sin lahar

Tabla 53

Fuerzas y momento de la presa para el río El Salto sin lahar

| Fuerzas | Fh (T) | Fv (T) | Momento (T.m) |
|----------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| Sv | 0 | -5637,82 | |
| Sh | 8456,72 | 0 | |
| Presa | | 46981,80 | 426890,72 |
| Σ | 8456,72 | 41343,98 | 426890,72 |

Tabla 54

Esfuerzos presa llena

| σ_{y1} | σ_{y2} |
|---------------------------|---------------------------|
| 95454,15kg/m ² | 18128,22kg/m ² |
| 95,45T/m ² | 18,13T/m ² |

5.1.1.2.4 Factor de seguridad al deslizamiento

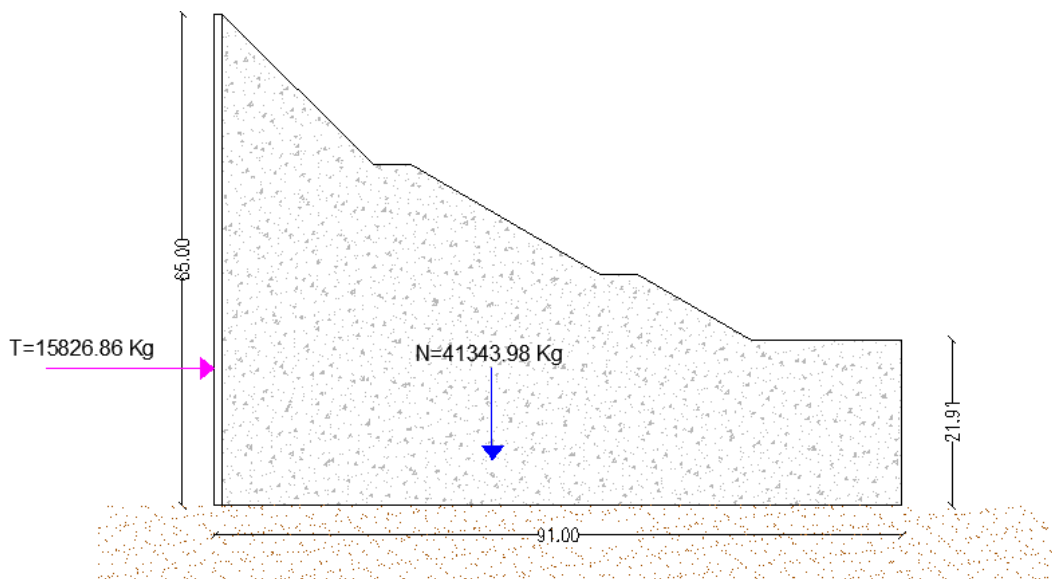


Figura 91. Seguridad al deslizamiento

Tabla 55

Coefficientes para el factor de seguridad al deslizamiento

| Tipo de roca | f | C (Mpa) |
|---|------|---------|
| Granitos u otras rocas no fisuradas, con resistencia temporal a la compresión mayores a 400 Kg/cm ² (40Mpa). | 0,75 | 0,4 |
| Rocas poco fisurados con mejoramiento de lechada de cemento hasta la profundidad mayor o igual a 0,1H; con resistencia temporal a la compresión mayores a 400 Kg/cm ² (40Mpa). | 0,7 | 0,3 |
| Rocas fisuradas, con resistencia temporal a la compresión entre 50 y 400 Kg/cm ² (5-40Mpa) | 0,65 | 0,2 |

Fuente: (Sandoval W.)

$$K_{sd} = \frac{fN \cos \alpha + T \operatorname{sen} \alpha + cF}{T \cos \alpha + N \operatorname{sen} \alpha}$$

$$K_{sd} = \frac{0,65 * 41343,98 * \cos(0) + 15826,86 * \operatorname{sen}(0) + 0,2 * 91}{15826,86 * \cos(0) + 41343,98 * \operatorname{sen}(0)}$$

$$K_{sd} = 1,70$$

La presa es estable, debido a que el factor de seguridad al deslizamiento es mayor a 1,1 para condiciones extremas.

5.1.1.3 Estabilidad de la presa de materiales sueltos

El análisis de equilibrio límite es uno de los métodos más utilizados para el estudio de estabilidad de taludes, consiste en suponer un mecanismo de falla para el talud y aplicar los criterios de resistencia del material (Criterios de Coulomb). La estabilidad se determina por medio del factor de seguridad que representa la magnitud en que puede reducirse la resistencia a cortante del suelo para que se genere deslizamiento a lo largo de la superficie de falla más desfavorable.

Los métodos aproximados de Fellenius y Bishop para el análisis de estabilidad de taludes, plantean una hipótesis de una superficie de falla circular, de tal manera que se puedan facilitar los cálculos y se tome en cuenta que el plano de falla es parecido al mecanismo real de falla. Para el análisis de los taludes se divide a la estructura en dovelas o franjas (Ortiz Quizhpi & Portilla Flores, 2014).

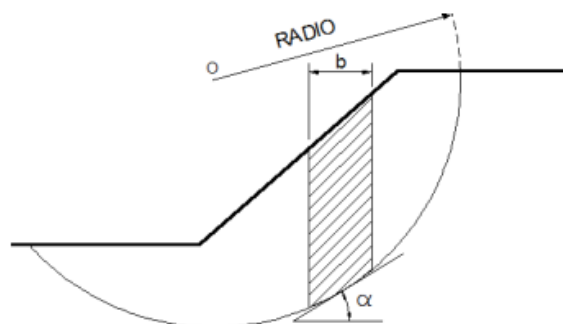


Figura 92. Circulo de falla de radio R

Fuente: (Ortiz Quizhpi & Portilla Flores, 2014)

Para realizar el respectivo análisis de la presa de materiales sueltos para el río El Salto se ha utilizado el software GeoStudio versión 2007, módulo SLOPE/W. Se ha considerado los modelos Bishop simplificado y

Morgenstern-Price (estático y pseudoestático). El análisis de estabilidad se lo realizó aguas arriba y aguas abajo de la presa.

En cuanto a las características del material empleado se consideró el modelo de Mohr-Coulomb.

$$\gamma = 21.58 \text{ KN/m}^3$$

$$c = 0 \text{ KPa}$$

$$\phi = 42^\circ$$

Para el modelo pseudoestático se tomó el coeficiente sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) 0.4g, adicionalmente se debe considerar un factor de importancia I, con la finalidad de incrementar la demanda sísmica de diseño para estructuras, que por sus características de uso deben permanecer operativas o sufrir menor daño durante y después de la ocurrencia del sismo de diseño.

Tabla 56

Factor de importancia según el tipo de estructura

| Categoría | Tipo de uso, destino e importancia | Coeficiente I |
|-----------------------------------|--|---------------|
| Edificaciones esenciales | Hospitales, clínicas, Centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil. Garajes o estacionamientos para vehículos y aviones que atienden emergencias. Torres de control aéreo. Estructuras de centros de telecomunicaciones u otros centros de atención de emergencias. Estructuras que albergan equipos de generación y distribución eléctrica. Tanques u otras estructuras utilizadas para depósito de agua u otras sustancias anti-incendio. Estructuras que albergan depósitos tóxicos, explosivos, químicos u otras sustancias peligrosas. | 1.5 |
| Estructuras de ocupación especial | Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas personas. Todas las estructuras que albergan más de cinco mil personas. Edificios públicos que requieren operar continuamente | 1.3 |
| Otras estructuras | Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las categorías anteriores | 1.0 |

Fuente: (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014)

El coeficiente sísmico se reduce en 50% puesto que este criterio es considerado en obras hidráulicas.

$$kh = 1.0 \times 0.50 * 0,40g = 0.20g$$

En las siguientes imágenes se presentan los resultados obtenidos.

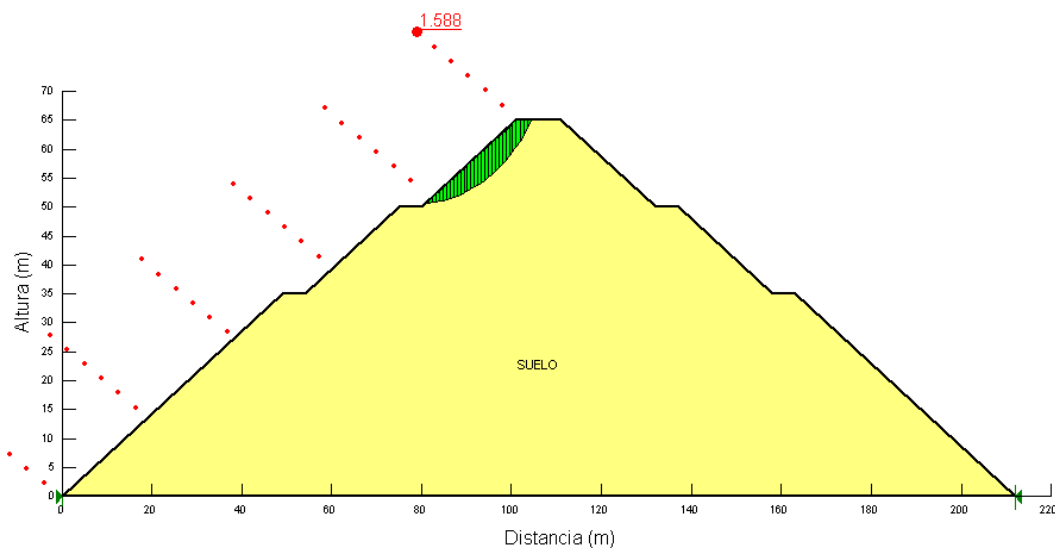


Figura 93. Presa de materiales sueltos – Análisis estático

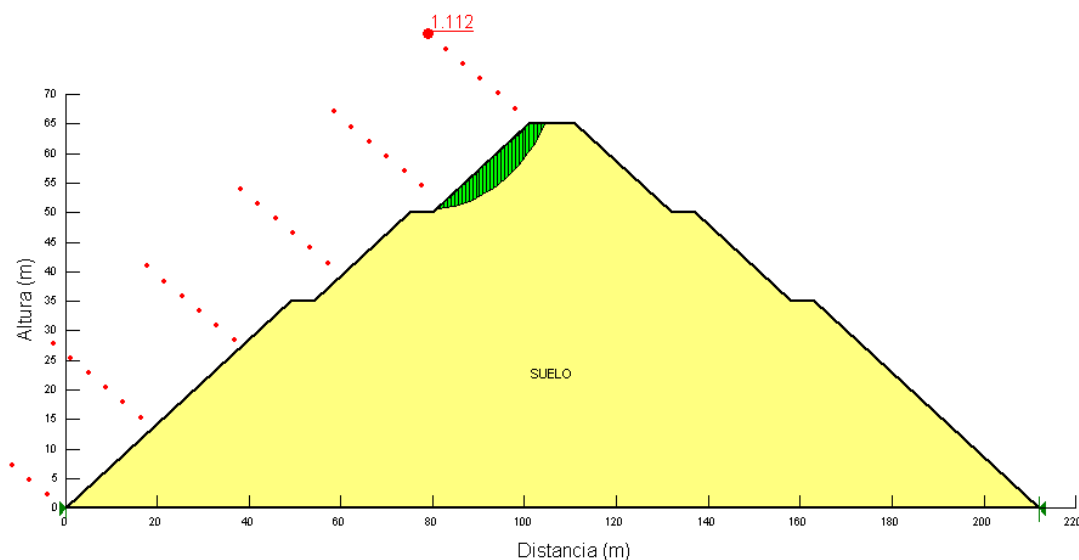


Figura 94. Presa de materiales sueltos – Análisis pseudoestático

Tabla 57**Factor de seguridad para la presa de materiales sueltos del río El Salto**

| Análisis | Bermas aguas arriba (5m) |
|----------------|--------------------------|
| Estático | 1.588 |
| Pseudoestático | 1.112 |

5.1.2 Diseño de la alcantarilla

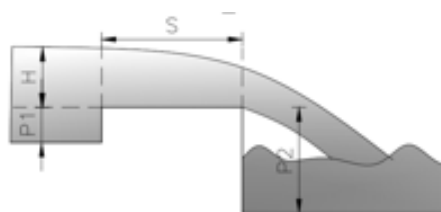
La estructura de la alcantarilla está ubicada de forma paralela al flujo del río El Salto y a lo largo de la presa mixta; desde los tres contrafuertes que fueron extendidos aguas arriba hasta la presa mixta aguas abajo, dicha obra está diseñada para un evento de 20 años de retorno.

Parámetros de diseño:

- La distancia entre contrafuertes es de 3.50 m y el espesor de las paredes de la estructura es de 1m.
- El material escogido para la alcantarilla es hormigón con una rugosidad de 0.014.
- La forma de la alcantarilla es rectangular cerrada (canal cerrado).

5.1.2.1 Entrada de la alcantarilla

El canal de entrada para la alcantarilla del río El Salto fue diseñado como un vertedero de cresta ancha con aristas vivas, de manera que para encontrar el coeficiente de caudal m , se utilizó la ecuación de A. Berezinsky.

**Figura 95. Vertedero de cresta ancha**

Fuente: (Sandoval W. , Principios de la Hidráulica 2, 2013)

$$m = 0,32 + 0,01 \frac{3 - \frac{p1}{H}}{0,46 + 0,75 \frac{p1}{H}}$$

Por lo general el coeficiente de caudal m se encuentra entre 0.30 a 0.35 y un máximo de 0.385; cuando p1=0.

$$H = \left(\frac{Q}{mb\sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$m=0,385$$

Tabla 58

Cálculo del tirante de agua en la entrada del canal

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|--------|
| Caudal m ³ /s (Q) | 33,51 |
| Coeficiente de caudal m | 0,3850 |
| Ancho de canal m (b) | 7,00 |
| Altura de Agua m (H) | 1,99 |

El tirante crítico representa a la energía mínima de una sección, la siguiente expresión determina el tirante crítico de canales de cualquier sección geométrica (Sandoval W. , Principios de la Hidráulica 2, 2013).

$$H_{cr} = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g b^2}}$$

$$\alpha = 1 + \frac{208}{C^2}$$

$$C = \frac{V}{\sqrt{R * i}}$$

$$R = \frac{A}{P}$$

Donde:

- α : Coeficiente de Coriolis (Altshul,1977)

- C: Coeficiente de Chezy
- R: Radio hidráulico (m)
- A: Área mojada (m²)
- P: Perímetro mojado (m).
- Q: Caudal de diseño (m³/s).
- V: velocidad (m/s)
- b: Base del canal (m)
- i: Pendiente del canal (i=0,001)

Tabla 59**Cálculo del tirante contraído**

| Parámetro | Valor |
|--------------------------|-------|
| Área (m ²) | 13,93 |
| Perímetro Mojado (m) | 10,98 |
| Radio Hidráulico (m) | 1,27 |
| Velocidad (m/s) | 2,41 |
| Coeficiente de Chezy | 67,54 |
| Coeficiente de Corio lis | 1,05 |
| Hcr (m) | 1,35 |

5.1.2.2 Longitud del pozo

Se diseña un colchón de aguas que cumplirá la función de contener el resalto hidráulico, para lo cual se diseña como un vertedero de caída recta.

$$D = \frac{q^2}{gh^3}$$

$$\frac{L_d}{h} = 4,30D^{0.27}$$

$$\frac{y_p}{h} = 1,0D^{0.22}$$

$$\frac{y_1}{h} = 0,54D^{0.22}$$

$$\frac{y_2}{h} = 1,66D^{0.27}$$

Donde:

- q : Caudal por unidad de ancho de la cresta de la caída (m^3/s).
- h : Altura de caída (m).
- g : Aceleración de la gravedad ($g = 9.8m/s^2$)
- D : Número de caída.
- L_d : Longitud de la caída, distancia entre el muro hasta y_1 .
- y_p : Nivel de la piscina baja la lámina del flujo.
- y_1 : Profundidad en el pie de la lámina del flujo o inicio del resalto hidráulico.
- y_2 : Profundidad secuenta de salida correspondiente a y_1 .

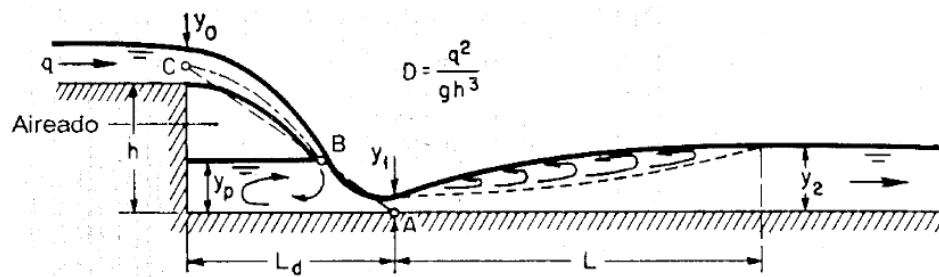


Figura 96. Geometría del flujo en un vertedero de caída recta

Fuente: (Chow, 1994)

Tabla 60

Parámetros del pozo de agua

| Parámetro | Valor |
|---------------------|-------|
| Velocidad (m/s) | 2,41 |
| Ancho de canal (m) | 7,00 |
| Área (m^2) | 13,93 |
| h (m) | 2,00 |
| D | 0,29 |
| L_d calculado (m) | 6,17 |
| L_d asignado (m) | 6,20 |
| Y_p (m) | 1,53 |
| Y_1 (m) | 0,64 |
| Y_2 (m) | 2,38 |

5.1.2.3 Rápida

Para el diseño de la rápida de la alcantarilla se encontró la velocidad de salida del flujo de agua, para lo cual se utilizó el software Hcanales.

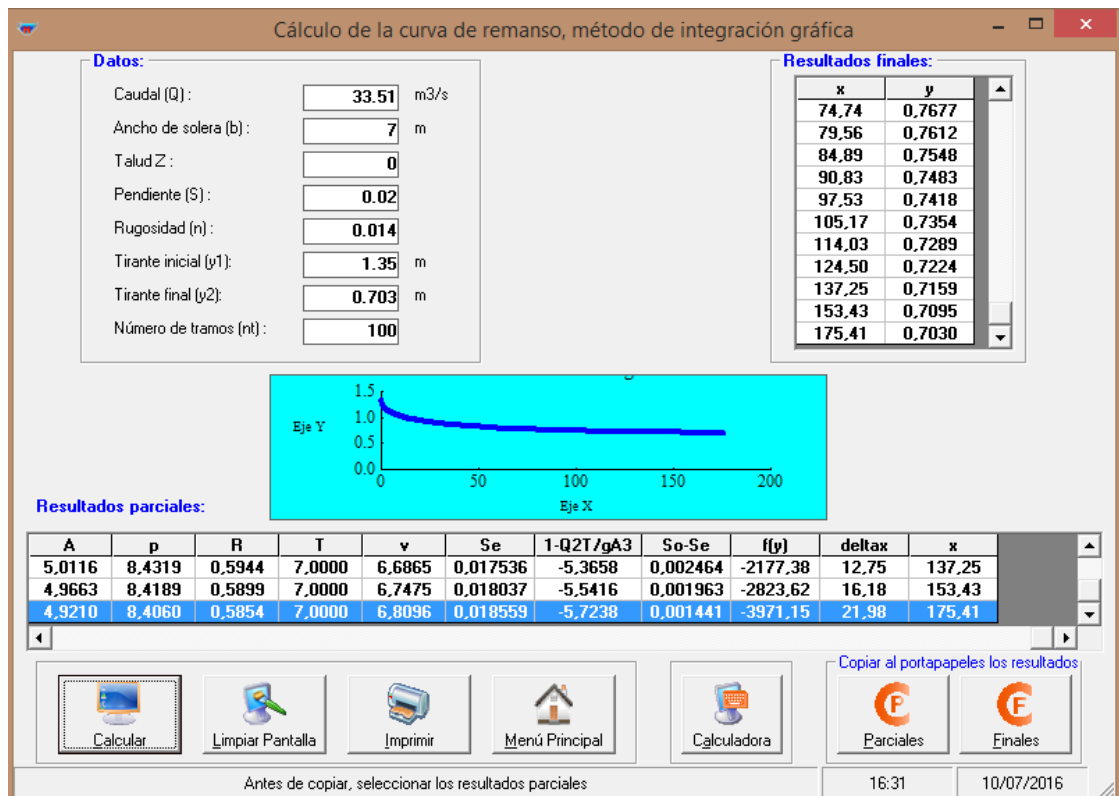


Figura 97. Curva de remanso para el río El Salto

Para una longitud de 176 m, se obtiene una velocidad de 6.81 m/s, la cual es menor que la velocidad admisible para un hormigón de $f'c=210$ Kg/cm².

5.1.2.4 Salida de la alcantarilla

Para la salida de la alcantarilla con la finalidad de encausar el flujo de agua se colocan muros de ala con espesor igual a sus paredes y con un ángulo de inclinación según Izzard.

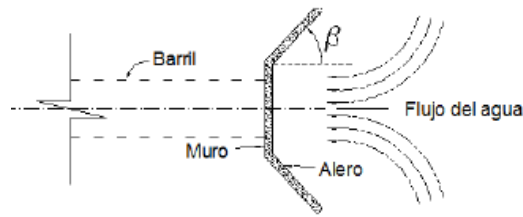


Figura 98. Ángulo de alabeo de una alcantarilla

Fuente: (Estudio de alcantarillas, 2014)

$$\tan \beta = 2.85 * \sqrt{\frac{\text{tirante de salida}}{\text{velocidad del flujo}}}$$

$$\tan \beta = 2.85 * \sqrt{\frac{0.70}{6.81}}$$

$$\beta = 43^\circ$$

Se coloca un zampeado aguas abajo de la presa en la salida de la alcantarilla con el criterio que la longitud no debe ser menor a tres veces la altura de la alcantarilla.

Longitud del zampeado = 11.00 m

5.1.3 Diseño del canal de rápida con tapa y columpio

El canal de rápidas con tapa y columpio se realiza de acuerdo con las recomendaciones de Mejía F. (2003), el CRTC es una estructura rectangular que se diseña a lo largo de pendientes desde 50% hasta 173%; está conformado por rápidas lisas que están interrumpidas en las bermas de un talud, en la transición de una rápida a otra se encuentra un columpio que deflecta el chorro y lo proyecta hacia la tapas de tal manera que se genera turbulencia y aireación del flujo y gran parte de la energía se disipa.

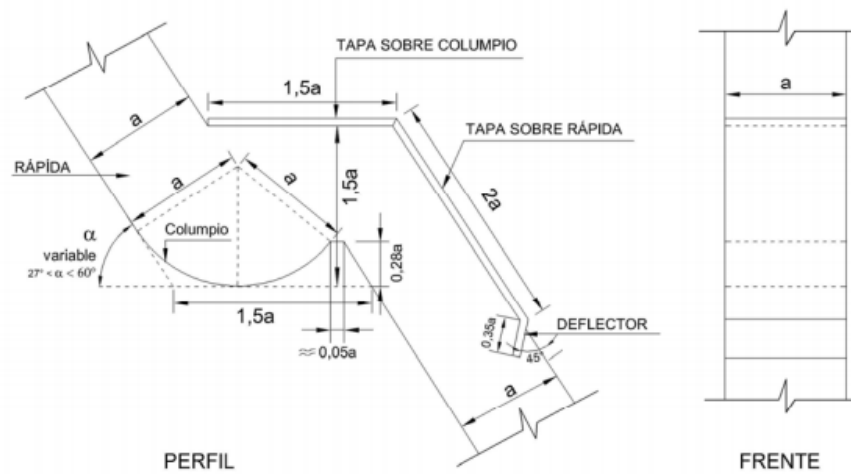


Figura 99. Canal de rápidas con tapa y columpio

Fuente: (Mejía Fernández, 2003)

Tabla 61

Velocidades máximas permisibles en rápidas lisas

| Material | Velocidad Máxima (m/s) |
|---------------------------------|------------------------|
| Ladrillo común | 3 |
| Ladrillo vitrificado | 5 |
| Arcilla vitrificada (gres) | 4 |
| Concreto 175 Kg/cm ² | 6 |
| Concreto 210 Kg/cm ² | 10 |
| Concreto 280 Kg/cm ² | 15 |
| Concreto 350 Kg/cm ² | 20 |

Fuente: (Mejía Fernández, 2003)

La estructura del CRTC para la presa del río El Salto está diseñada desde la corona hasta el pie de la presa de materiales sueltos; en donde se encuentran extendidos los tres contrafuertes y de esta manera servirán de soporte a la estructura del canal. El objetivo de la estructura es conducir el flujo esperado y evitar el taponamiento de la alcantarilla.

$$a = 0.905 \times Q^{0.4}$$

$$V_{rap} = 9.457 \times Q^{0.2}$$

$$V_{prom} = 7,230 \times Q^{0.2}$$

Donde:

- a: Ancho del canal (m)
- Q: Caudal de diseño (m^3/s)
- V_{rap} : Velocidad en el rápida (m/s)
- V_{prom} : Velocidad promedio (m/s)

$$Q_{diseño} = 33.51 \frac{m^3}{s}$$

$$a = 3.69m$$

$$V_{rap} = 19.09 \frac{m}{s}$$

$$V_{prom} = 14.59 \frac{m}{s}$$

Con los valores obtenidos se decide diseñar el CRTC, adoptando un espesor de paredes de la rápida de 0.25 m. Se debe colocar hormigón de 350 Kg/cm².

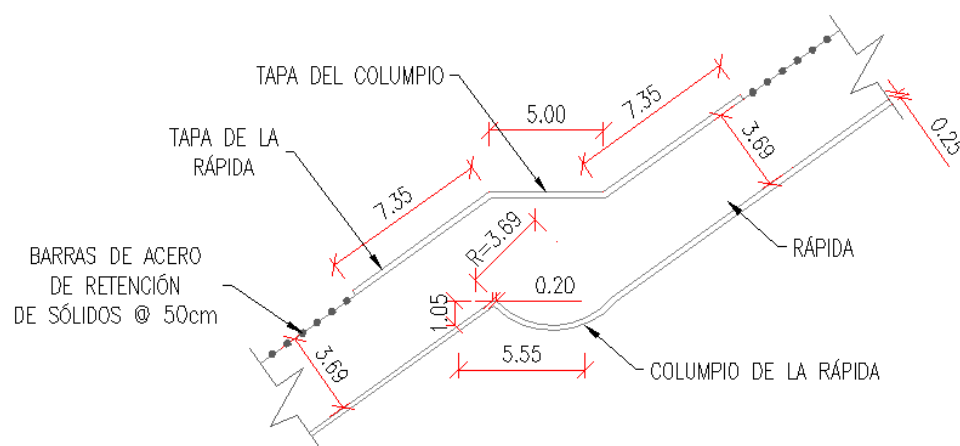


Figura 100. Canal de rápidas con tapa y columpio (Río El Salto)

5.1.4 Estructura de descarga

Para descargar el volumen en exceso que proviene del flujo de lodo y escombros generado por los deshielos del casquete glaciar del volcán Cotopaxi en caso de producirse una erupción de gran magnitud, se diseña un vertedero de cresta ancha en el cuál se dimensiona la base de la descarga, por este vertedero fluye el volumen excedente una vez que la estructura alcance el volumen de embalse para la que fue diseñada. Existen 5m hasta el borde libre.

$$V_{ex} = V_{la} - V_{em}$$

Donde:

- V_{ex} : Volumen de descarga (m³).
- V_{la} : Volumen del lahar (m³).
- V_{em} : Volumen del embalse (m³).

Para determinar el ancho del vertedero se aplica la fórmula de caudal de Manning.

$$Q = m * b * \sqrt{2g} * h^{3/2}$$

Tabla 62

Dimensiones de la estructura de descarga para el río El Salto

| Altura | Volumen del embalse (Hm ³) | Volumen del lahar (Hm ³) | Volumen excedente (Hm ³) | Q descarga (m ³ /s) | Ho (m) | m | b (m) |
|--------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------|------|-------|
| 50 | 2,96 | 3,23 | 0,27 | 300 | 5 | 0,37 | 16,37 |

Para el ancho del vertedero de descarga de la presa del río El Salto se opta por una base de 17 m, puesto que satisface las condiciones requeridas.

5.2 Presa mixta del río Pita

5.2.1 Estabilidad de la presa

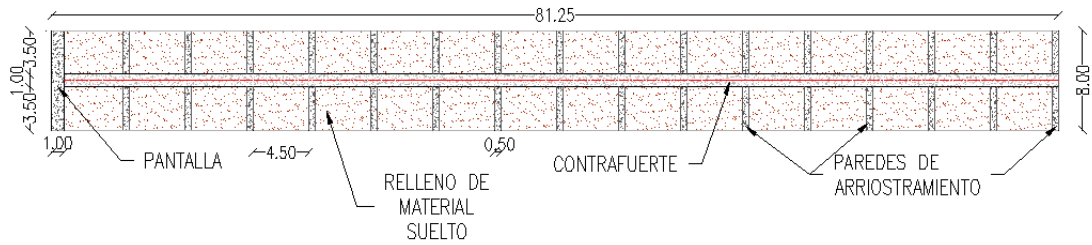


Figura 101. Franja de diseño

5.2.1.1 Factor de seguridad volcamiento

5.2.1.1.1 Momento estabilizador

Se realiza un procedimiento similar a la presa del río El Salto.

$$f'c = 2,40 T/m^3$$

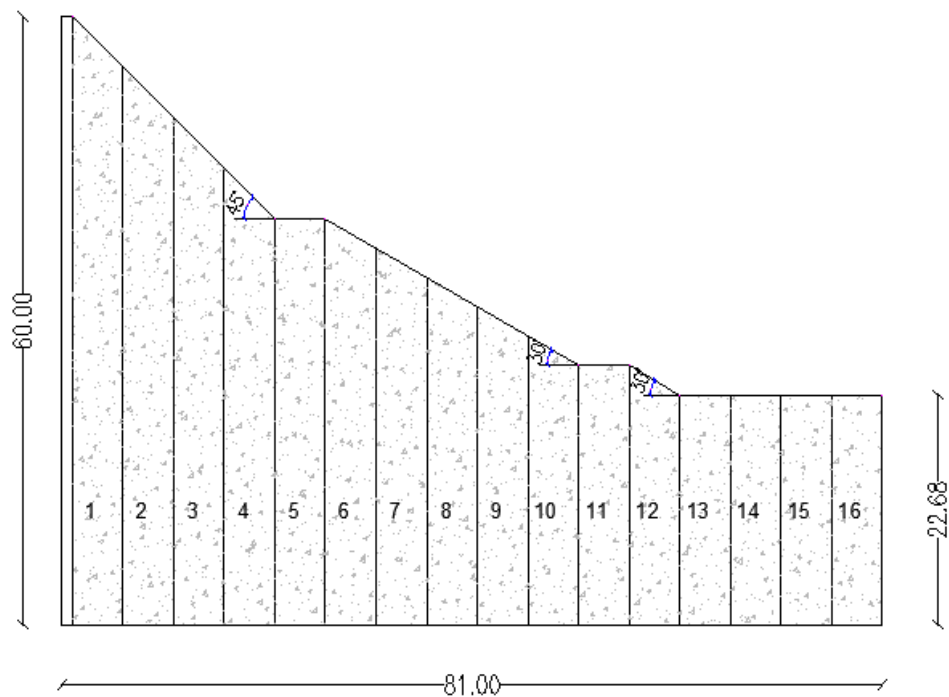


Figura 102. Geometría del contrafuerte

Tabla 63

Momento estabilizador para el contrafuerte

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | Espesor (m) | V1 (m³) | V2 (m³) | Carga1 (T) | Carga2 (T) | Brazo1 (m) | Brazo2 (m) | Me (T.m) |
|----|--------|-------|-------|-------|-------------|---------|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 1 | 45 | 60 | 5 | 55,00 | 1 | 275,00 | 12,50 | 660,00 | 30,00 | 77,50 | 78,33 | 53500,00 |
| 2 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 1 | 250,00 | 12,50 | 600,00 | 30,00 | 72,50 | 73,33 | 45700,00 |
| 3 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 1 | 225,00 | 12,50 | 540,00 | 30,00 | 67,50 | 68,33 | 38500,00 |
| 4 | 45 | 45,00 | 5 | 40,00 | 1 | 200,00 | 12,50 | 480,00 | 30,00 | 62,50 | 63,33 | 31900,00 |
| 5 | 0 | 40,00 | 5 | 40,00 | 1 | 200,00 | 0,00 | 480,00 | 0,00 | 57,50 | 58,33 | 27600,00 |
| 6 | 30 | 40,00 | 5 | 37,11 | 1 | 185,57 | 7,22 | 445,36 | 17,32 | 52,50 | 53,33 | 24305,11 |
| 7 | 30 | 37,11 | 5 | 34,23 | 1 | 171,13 | 7,22 | 410,72 | 17,32 | 47,50 | 48,33 | 20346,26 |
| 8 | 30 | 34,23 | 5 | 31,34 | 1 | 156,70 | 7,22 | 376,08 | 17,32 | 42,50 | 43,33 | 16733,83 |
| 9 | 30 | 31,34 | 5 | 28,45 | 1 | 142,26 | 7,22 | 341,44 | 17,32 | 37,50 | 38,33 | 13467,80 |
| 10 | 30 | 28,45 | 5 | 25,57 | 1 | 127,83 | 7,22 | 306,79 | 17,32 | 32,50 | 33,33 | 10548,19 |
| 11 | 0 | 25,57 | 5 | 25,57 | 1 | 127,83 | 0,00 | 306,79 | 0,00 | 27,50 | 28,33 | 8436,86 |
| 12 | 30 | 25,57 | 5 | 22,68 | 1 | 113,40 | 7,22 | 272,15 | 17,32 | 22,50 | 23,33 | 6527,61 |
| 13 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 1 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 17,50 | 18,33 | 4762,69 |
| 14 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 1 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 12,50 | 13,33 | 3401,92 |
| 15 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 1 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 7,50 | 8,33 | 2041,15 |
| 16 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 1 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 2,50 | 3,33 | 680,38 |
| | | | | | | 2628,31 | 93,30 | 6307,95 | 223,92 | | | 308451,80 |

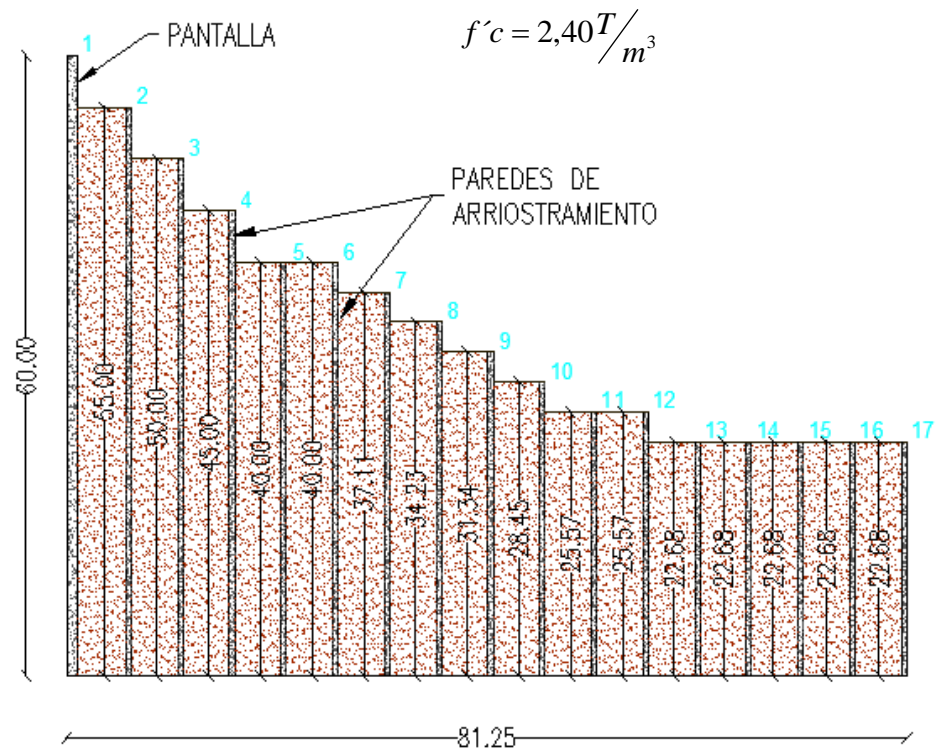


Figura 103. Pantalla y paredes de arriostramiento

Tabla 64

Momento estabilizador para la pantalla y las paredes arriostramiento

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | Espesor (m) | V (m ³) | Carga (T) | Brazo (m) | Me (T.m) |
|----|--------|-------|-------|-------|-------------|---------------------|-----------|-----------|----------|
| 1 | 45 | 60 | 5 | 55,00 | 1 | 480,00 | 1152,00 | 80,5 | 92736,00 |
| 2 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 0,5 | 220,00 | 528,00 | 80 | 42240,00 |
| 3 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 0,5 | 200,00 | 480,00 | 75 | 36000,00 |
| 4 | 45 | 45,00 | 5 | 40,00 | 0,5 | 180,00 | 432,00 | 70 | 30240,00 |
| 5 | 0 | 40,00 | 5 | 40,00 | 0,5 | 160,00 | 384,00 | 65 | 24960,00 |
| 6 | 30 | 40,00 | 5 | 37,11 | 0,5 | 160,00 | 384,00 | 60 | 23040,00 |
| 7 | 30 | 37,11 | 5 | 34,23 | 0,5 | 148,45 | 356,29 | 55 | 19595,80 |
| 8 | 30 | 34,23 | 5 | 31,34 | 0,5 | 136,91 | 328,57 | 50 | 16428,72 |
| 9 | 30 | 31,34 | 5 | 28,45 | 0,5 | 125,36 | 300,86 | 45 | 13538,77 |
| 10 | 30 | 28,45 | 5 | 25,57 | 0,5 | 113,81 | 273,15 | 40 | 10925,95 |
| 11 | 0 | 25,57 | 5 | 25,57 | 0,5 | 102,26 | 245,44 | 35 | 8590,26 |
| 12 | 30 | 25,57 | 5 | 22,68 | 0,5 | 102,26 | 245,44 | 30 | 7363,08 |
| 13 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 25 | 5443,08 |
| 14 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 20 | 4354,46 |
| 15 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 15 | 3265,85 |
| 16 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 10 | 2177,23 |
| 17 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 5 | 1088,62 |
| | | | | | | 2582,65 | 6198,36 | 341987,80 | |

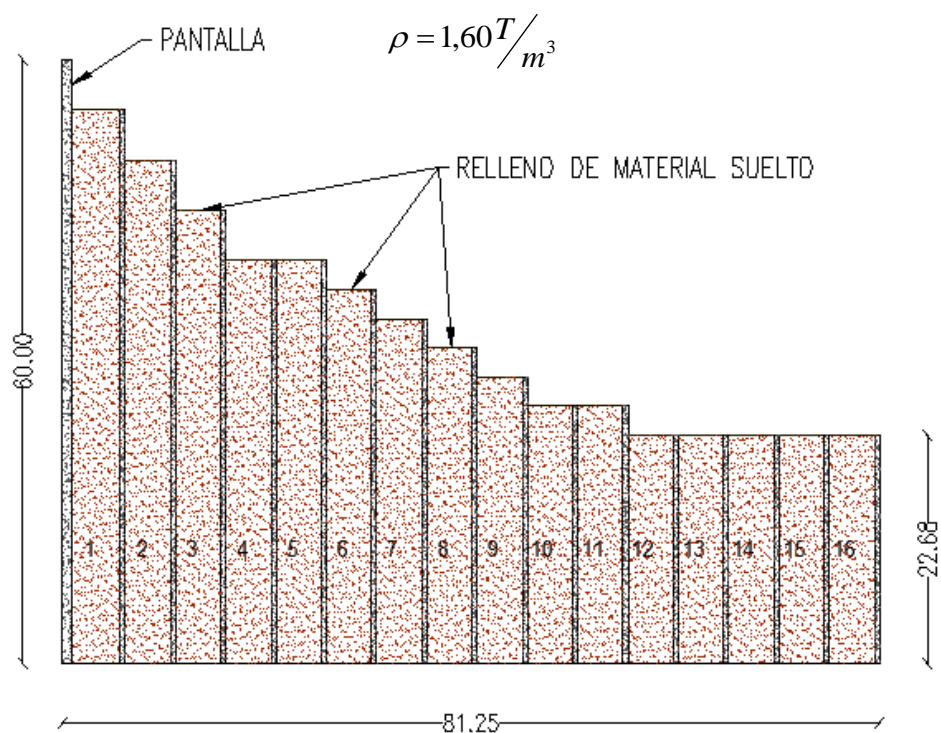


Figura 104. Relleno de material suelto (Suelo)

Tabla 65

Momento estabilizador para el relleno de material suelto

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | d (m) | V (m ³) | Carga (T) | Brazo (m) | Me (T.m) |
|----|--------|----------|----------|----------|----------|------------------------|-----------------|--------------|-------------------|
| 1 | 45 | 60 | 5 | 55,00 | 4,75 | 1828,75 | 2926,00 | 77,5 | 226765,00 |
| 2 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 4,5 | 1575,00 | 2520,00 | 72,5 | 182700,00 |
| 3 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 4,5 | 1417,50 | 2268,00 | 67,5 | 153090,00 |
| 4 | 45 | 45,00 | 5 | 40,00 | 4,5 | 1260,00 | 2016,00 | 62,5 | 126000,00 |
| 5 | 0 | 40,00 | 5 | 40,00 | 4,5 | 1260,00 | 2016,00 | 57,5 | 115920,00 |
| 6 | 30 | 40,00 | 5 | 37,11 | 4,5 | 1169,07 | 1870,51 | 52,5 | 98201,66 |
| 7 | 30 | 37,11 | 5 | 34,23 | 4,5 | 1078,13 | 1725,02 | 47,5 | 81938,23 |
| 8 | 30 | 34,23 | 5 | 31,34 | 4,5 | 987,20 | 1579,52 | 42,5 | 67129,74 |
| 9 | 30 | 31,34 | 5 | 28,45 | 4,5 | 896,27 | 1434,03 | 37,5 | 53776,16 |
| 10 | 30 | 28,45 | 5 | 25,57 | 4,5 | 805,34 | 1288,54 | 32,5 | 41877,51 |
| 11 | 0 | 25,57 | 5 | 25,57 | 4,5 | 805,34 | 1288,54 | 27,5 | 35434,81 |
| 12 | 30 | 25,57 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 22,5 | 25718,54 |
| 13 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 17,5 | 20003,31 |
| 14 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 12,5 | 14288,08 |
| 15 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 7,5 | 8572,85 |
| 16 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 2,5 | 2857,62 |
| | | | | | | <u>16654,62</u> | <u>26647,39</u> | | <u>1254273,51</u> |

Tabla 66

Momento estabilizador

| Elemento | Carga (T) | Momento (T.m) |
|--------------------------------------|------------------|-------------------|
| Contrafuerte | 6531,87 | 308451,80 |
| Pantalla y paredes de arriostamiento | 6198,36 | 341987,80 |
| Relleno de material suelto | 26647,39 | 1254273,51 |
| | <u>39377,618</u> | <u>1904713,11</u> |

5.2.1.1.2 Momento volcador

Para hallar la fuerza de presión del lahar hemos considerado un ángulo de fricción interna de 42° que fue calculado en el ensayo de corte directo y un peso específico de 2,2 T/m³.

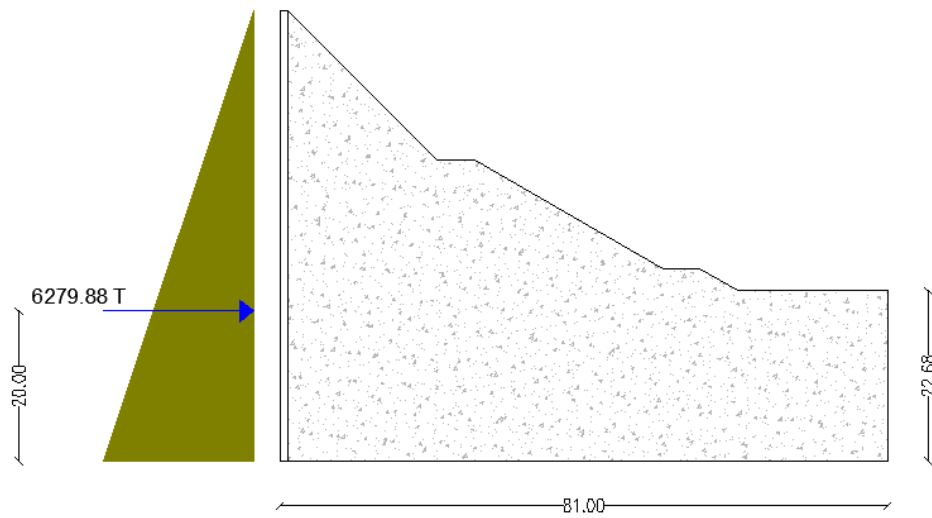


Figura 105. Empuje del lahar

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}\phi}{1 + \text{sen}\phi}$$

$$K_a = \frac{1 - \text{sen}(42)}{1 + \text{sen}(42)}$$

$$K_a = 0,1982$$

$$E = \frac{1}{2} * K_a * \gamma * H^2$$

Tabla 67

Momento volcador

| H(m) | E (T) | Mv (T.m) |
|------|---------|-----------|
| 60 | 6279,88 | 125597,63 |

5.2.1.1.3 Factor de seguridad volcamiento

$$F_{sv} = \frac{M_e}{M_v}$$

$$F_{sv} = \frac{1904713.11}{125597.63}$$

$$F_{sv} = 15,17 > 1,5$$

5.2.1.2 Esfuerzos y factor de seguridad al deslizamiento

Tabla 68

Momento centro base para el contrafuerte

| N° | V1 (m³) | V2 (m³) | Carga 1 (T) | Carga2 (T) | BrazoX 1 (m) | BrazoX 2 (m) | BrazoY1 (m) | BrazoY2 (m) | Mx (T.m) | My (T.m) |
|----|------------|------------|----------------|---------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------|-------------|
| 1 | 275,00 | 12,50 | 660,00 | 30,00 | 37,00 | 37,83 | 27,50 | 56,67 | 25555,00 | 19850,00 |
| 2 | 250,00 | 12,50 | 600,00 | 30,00 | 32,00 | 32,83 | 25,00 | 51,67 | 20185,00 | 16550,00 |
| 3 | 225,00 | 12,50 | 540,00 | 30,00 | 27,00 | 27,83 | 22,50 | 46,67 | 15415,00 | 13550,00 |
| 4 | 200,00 | 12,50 | 480,00 | 30,00 | 22,00 | 22,83 | 20,00 | 41,67 | 11245,00 | 10850,00 |
| 5 | 200,00 | 0,00 | 480,00 | 0,00 | 17,00 | 17,83 | 20,00 | 40,00 | 8160,00 | 9600,00 |
| 6 | 185,57 | 7,22 | 445,36 | 17,32 | 12,00 | 12,83 | 18,56 | 38,08 | 5566,59 | 8923,85 |
| 7 | 171,13 | 7,22 | 410,72 | 17,32 | 7,00 | 7,83 | 17,11 | 35,19 | 3010,70 | 7638,21 |
| 8 | 156,70 | 7,22 | 376,08 | 17,32 | 2,00 | 2,83 | 15,67 | 32,30 | 801,23 | 6452,57 |
| 9 | 142,26 | 7,22 | 341,44 | 17,32 | 3,00 | 2,17 | 14,23 | 29,42 | 1061,84 | 5366,92 |
| 10 | 127,83 | 7,22 | 306,79 | 17,32 | 8,00 | 7,17 | 12,78 | 26,53 | 2578,49 | 4381,28 |
| 11 | 127,83 | 0,00 | 306,79 | 0,00 | 13,00 | 12,17 | 12,78 | 25,57 | 3988,33 | 3921,80 |
| 12 | 113,40 | 7,22 | 272,15 | 17,32 | 18,00 | 17,17 | 11,34 | 23,64 | 5196,11 | 3495,64 |
| 13 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 23,00 | 22,17 | 11,34 | 22,68 | 6259,54 | 3086,16 |
| 14 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 28,00 | 27,17 | 11,34 | 22,68 | 7620,31 | 3086,16 |
| 15 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 33,00 | 32,17 | 11,34 | 22,68 | 8981,08 | 3086,16 |
| 16 | 113,40 | 0,00 | 272,15 | 0,00 | 38,00 | 37,17 | 11,34 | 22,68 | 10341,85 | 3086,16 |
| | 2628,3 | 93,30 | 6307,9 | 223,92 | | | | | 135966,06 | 122924,8 |

Tabla 69

Momento centro base para la pantalla y las paredes de arriostramiento

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | Espesor (m) | V (m³) | Carga (T) | BrazoX (m) | BrazoY (m) | Mx (T.m) | My (T.m) |
|----|--------|----------|----------|----------|----------------|-----------|--------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 1 | 45 | 60 | 5 | 55,00 | 1 | 480,00 | 1152,00 | 40,00 | 30,00 | 46080,00 | 34560,00 |
| 2 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 0,5 | 220,00 | 528,00 | 34,50 | 27,50 | 18216,00 | 14520,00 |
| 3 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 0,5 | 200,00 | 480,00 | 29,50 | 25,00 | 14160,00 | 12000,00 |
| 4 | 45 | 45,00 | 5 | 40,00 | 0,5 | 180,00 | 432,00 | 24,50 | 22,50 | 10584,00 | 9720,00 |
| 5 | 0 | 40,00 | 5 | 40,00 | 0,5 | 160,00 | 384,00 | 19,50 | 20,00 | 7488,00 | 7680,00 |
| 6 | 30 | 40,00 | 5 | 37,11 | 0,5 | 160,00 | 384,00 | 14,50 | 20,00 | 5568,00 | 7680,00 |
| 7 | 30 | 37,11 | 5 | 34,23 | 0,5 | 148,45 | 356,29 | 9,50 | 18,56 | 3384,73 | 6611,49 |
| 8 | 30 | 34,23 | 5 | 31,34 | 0,5 | 136,91 | 328,57 | 4,50 | 17,11 | 1478,58 | 5622,97 |
| 9 | 30 | 31,34 | 5 | 28,45 | 0,5 | 125,36 | 300,86 | 0,50 | 15,67 | 150,43 | 4714,46 |
| 10 | 30 | 28,45 | 5 | 25,57 | 0,5 | 113,81 | 273,15 | 5,50 | 14,23 | 1502,32 | 3885,95 |
| 11 | 0 | 25,57 | 5 | 25,57 | 0,5 | 102,26 | 245,44 | 10,50 | 12,78 | 2577,08 | 3137,44 |
| 12 | 30 | 25,57 | 5 | 22,68 | 0,5 | 102,26 | 245,44 | 15,50 | 12,78 | 3804,26 | 3137,44 |
| 13 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 20,50 | 11,34 | 4463,32 | 2468,92 |

CONTINÚA



| | | | | | | | | | | | |
|----|---|-------|---|-------|-----|----------------|----------------|-------|-------|------------------|------------------|
| 14 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 25,50 | 11,34 | 5551,94 | 2468,92 |
| 15 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 30,50 | 11,34 | 6640,56 | 2468,92 |
| 16 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 35,50 | 11,34 | 7729,17 | 2468,92 |
| 17 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 0,5 | 90,72 | 217,72 | 40,50 | 11,34 | 8817,79 | 2468,92 |
| | | | | | | <u>2582,65</u> | <u>6198,36</u> | | | <u>148196,17</u> | <u>125614,37</u> |

Tabla 70

Momento centro base para el relleno de material suelto

| N° | Ángulo | a (m) | b (m) | c (m) | d (m) | V (m3) | Carga (T) | BrazoX (m) | BrazoY (m) | Mx (T.m) | My (T.m) |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|-----------------|-----------------|------------|------------|------------------|------------------|
| 1 | 45 | 60 | 5 | 55,00 | 4,75 | 1828,75 | 2926,00 | 37,00 | 27,50 | 108262,00 | 80465,00 |
| 2 | 45 | 55,00 | 5 | 50,00 | 4,5 | 1575,00 | 2520,00 | 32,00 | 25,00 | 80640,00 | 63000,00 |
| 3 | 45 | 50,00 | 5 | 45,00 | 4,5 | 1417,50 | 2268,00 | 27,00 | 22,50 | 61236,00 | 51030,00 |
| 4 | 45 | 45,00 | 5 | 40,00 | 4,5 | 1260,00 | 2016,00 | 22,00 | 20,00 | 44352,00 | 40320,00 |
| 5 | 0 | 40,00 | 5 | 40,00 | 4,5 | 1260,00 | 2016,00 | 17,00 | 20,00 | 34272,00 | 40320,00 |
| 6 | 30 | 40,00 | 5 | 37,11 | 4,5 | 1169,07 | 1870,51 | 12,00 | 18,56 | 22446,09 | 34710,31 |
| 7 | 30 | 37,11 | 5 | 34,23 | 4,5 | 1078,13 | 1725,02 | 7,00 | 17,11 | 12075,11 | 29520,62 |
| 8 | 30 | 34,23 | 5 | 31,34 | 4,5 | 987,20 | 1579,52 | 2,00 | 15,67 | 3159,05 | 24750,93 |
| 9 | 30 | 31,34 | 5 | 28,45 | 4,5 | 896,27 | 1434,03 | 3,00 | 14,23 | 4302,09 | 20401,24 |
| 10 | 30 | 28,45 | 5 | 25,57 | 4,5 | 805,34 | 1288,54 | 8,00 | 12,78 | 10308,31 | 16471,55 |
| 11 | 0 | 25,57 | 5 | 25,57 | 4,5 | 805,34 | 1288,54 | 13,00 | 12,78 | 16751,00 | 16471,55 |
| 12 | 30 | 25,57 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 18,00 | 11,34 | 20574,84 | 12961,86 |
| 13 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 23,00 | 11,34 | 26290,07 | 12961,86 |
| 14 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 28,00 | 11,34 | 32005,30 | 12961,86 |
| 15 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 33,00 | 11,34 | 37720,53 | 12961,86 |
| 16 | 0 | 22,68 | 5 | 22,68 | 4,5 | 714,40 | 1143,05 | 38,00 | 11,34 | 43435,76 | 12961,86 |
| | | | | | | <u>16654,62</u> | <u>26647,39</u> | | | <u>557830,15</u> | <u>482270,46</u> |

Tabla 71

Momento centro base

| Elemento | Carga (T) | Momento X (T.m) | Momento Y (T.m) |
|--------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Contrafuerte | 6531,872 | 135966,06 | 122924,89 |
| Pantalla y paredes de arriostamiento | 6198,36 | 148196,17 | 125614,37 |
| Relleno de material suelto | 26647,39 | 557830,15 | 482270,46 |
| | <u>39377,618</u> | <u>841992,38</u> | <u>730809,73</u> |

5.2.1.2.1 Fuerzas sísmicas

Se realizó un procedimiento similar para hallar la fuerza horizontal y la fuerza vertical sísmicas, al anteriormente mencionado para la presa del río El Salto utilizando las fórmulas propuestas por el NEC (2014).

$$\alpha_h = \frac{0.4}{1 + 3 * 0.4} = 0.18$$

$$S_h = 39377.62T * 0.18 = 7087.971T$$

$$\alpha_v = \frac{2}{3} * 0.18 = 0.12$$

$$S_v = 39377.62T * 0.12 = 4725.41T$$

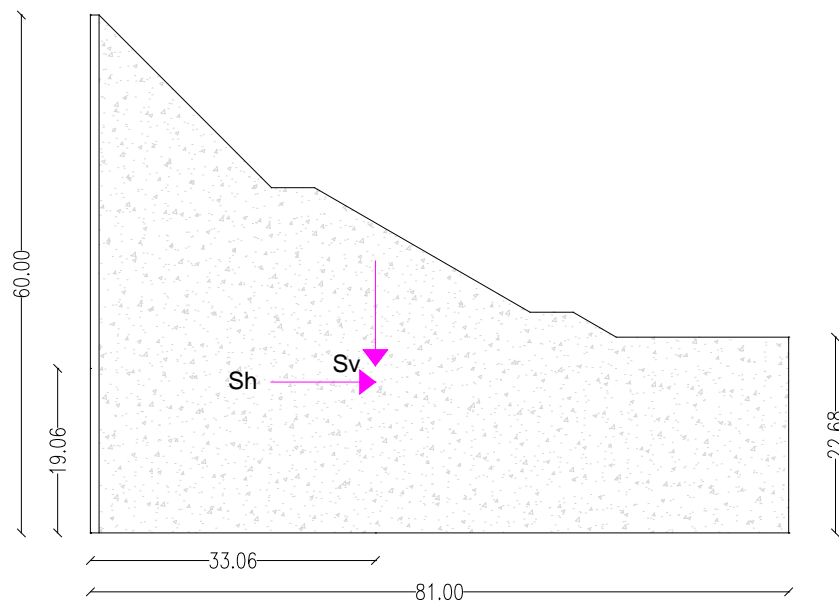


Figura 106. Fuerzas sísmicas

Centro de gravedad

Centro de gravedad realizado en Autocad.

$$x = 33.06 \text{ m}$$

$$y = 19.06$$

```

----- REGIONS -----
Area:                2781.6134
Perimeter:           257.6048
Bounding box:        X: 0.0000  --  81.0000
                    Y: 0.0000  --  60.0000
Centroid:            X: 33.0596
                    Y: 19.0604
Moments of inertia:  X: 1482271.7090
                    Y: 4530311.1657
Product of inertia:  XY: 1378838.4279
Radii of gyration:   X: 23.0842
                    Y: 40.3567
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 349163.2954 along [0.9503 -0.3114]
                    J: 1612727.4614 along [0.3114 0.9503]

```

Figura 107. Centro de gravedad de AutoCAD

5.2.1.2.2 Fuerzas con lahar

Tabla 72

Fuerzas y momento de la presa para el río Pita considerando lahar

| Fuerzas | Fh T | Fv T | Momento T.m |
|---------|----------|----------|----------------|
| E | 6279,88 | 0 | -125597,63 |
| Sv | 0 | -4725,31 | |
| Sh | 7087,97 | 0 | |
| Presa | | 39377,62 | 292985,23 |
| Σ | 13367,85 | 34652,30 | 167387,60 |

Tabla 73

Esfuerzos presa llena

| σ_{y1} | σ_{y2} |
|---------------------------|---------------------------|
| 72610,16kg/m ² | 34341,39kg/m ² |
| 72,61T/m ² | 34,34T/m ² |

5.2.1.2.3 Fuerzas sin lahar

Tabla 74

Fuerzas y momento de la presa para el río Pita sin lahar

| Fueras | Fh (T) | Fv (T) | Momento (T.m) |
|----------|-----------|-----------|------------------|
| Sv | 0 | -4725,31 | |
| Sh | 7087,97 | 0,00 | |
| Presa | | 39377,62 | 292985,23 |
| Σ | 7087,97 | 34652,30 | 292985,23 |

Tabla 75

Esfuerzos presa llena

| σ_{y1} | σ_{y2} |
|---------------------------|---------------------------|
| 86967,46Kg/m ² | 19984,10Kg/m ² |
| 86,97T/m ² | 19,98T/m ² |

5.2.1.2.4 Factor de seguridad deslizamiento

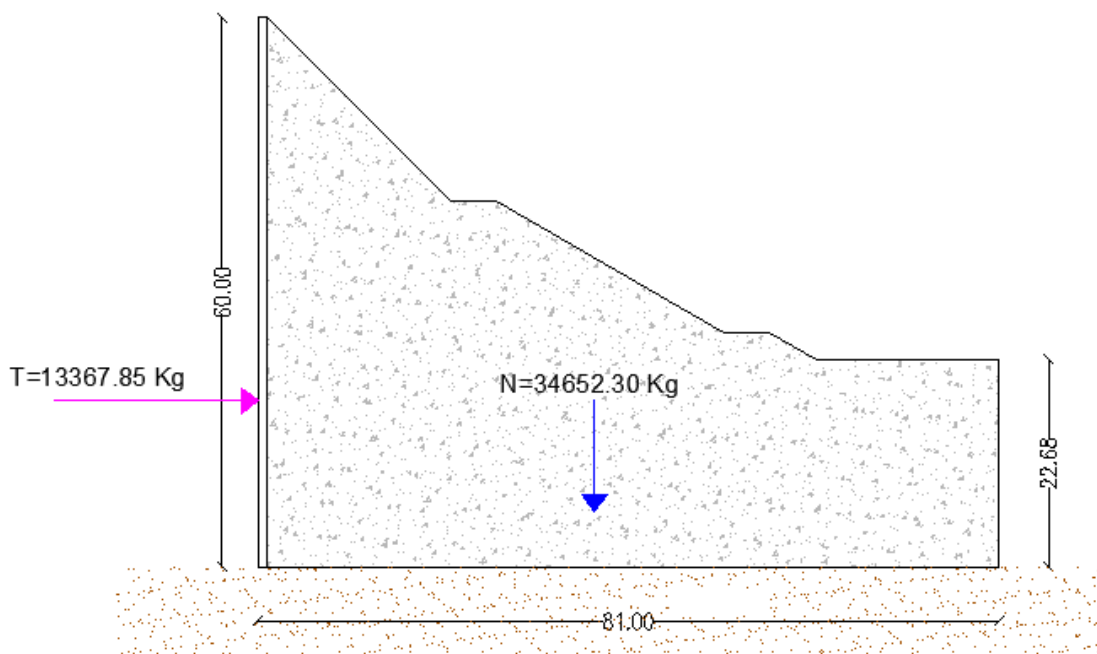


Figura 108. Seguridad al deslizamiento

Tabla 76

Coeficientes para el factor de seguridad al deslizamiento

| Tipo de roca | f | C (Mpa) |
|---|------|---------|
| Granitos u otras rocas no fisuradas, con resistencia temporal a la compresión mayores a 400 Kg/cm ² (40Mpa). | 0,75 | 0,4 |
| Rocas poco fisurados con mejoramiento de lechada de cemento hasta la profundidad mayor o igual a 0,1H; con resistencia temporal a la compresión mayores a 400 Kg/cm ² (40Mpa). | 0,7 | 0,3 |
| Rocas fisuradas, con resistencia temporal a la compresión entre 50 y 400 Kg/cm ² (5-40Mpa) | 0,65 | 0,2 |

Fuente: (Sandoval W.)

$$Ksd = \frac{fN \cos \alpha + T \operatorname{sen} \alpha + cF}{T \cos \alpha + N \operatorname{sen} \alpha}$$

$$Ksd = \frac{0.65 * 34652.30 * \cos(0) + 13367.85 * \operatorname{sen}(0) + 0.2 * 81}{113367.85 * \cos(0) + 34652.30 * \operatorname{sen}(0)}$$

$$Ksd = 1,7$$

La presa es estable puesto que el factor de seguridad a deslizamiento es mayor a 1,1 para condiciones extremas.

5.2.1.3 Estabilidad de la presa de materiales sueltos

Para el análisis de la presa de materiales sueltos del río Pita se procedió de manera similar a lo explicado anteriormente en la estabilidad de la presa de materiales sueltos para el río El Salto.

$$\gamma = 21.58 \text{ KN/m}^3$$

$$c = 0 \text{ KPa}$$

$$\phi = 42^\circ$$

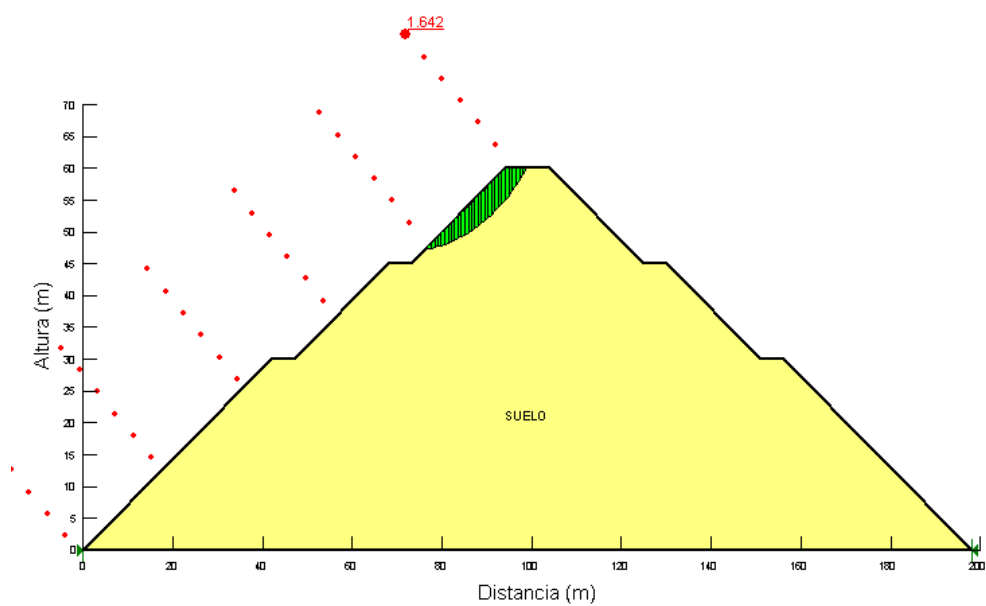


Figura 109. Presa de materiales sueltos – Análisis estático

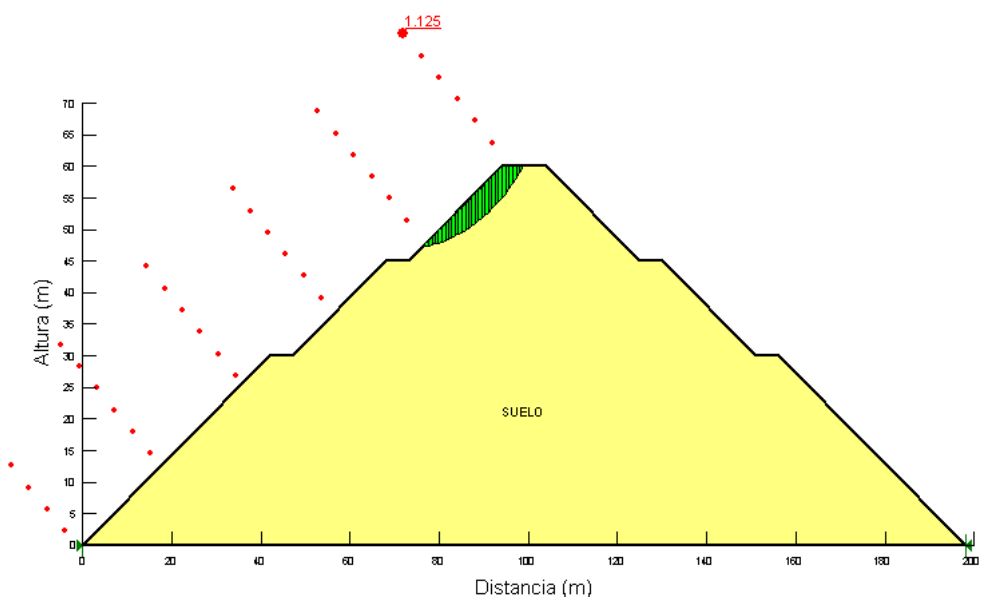


Figura 110. Presa de materiales sueltos – Análisis pseudoestático

Tabla 77

Factor de seguridad para la presa de materiales sueltos del río Pita

| Análisis | Bermas aguas arriba (5m) |
|----------------|--------------------------|
| Estático | 1.642 |
| Pseudoestático | 1.125 |

5.2.2 Diseño de la alcantarilla

Para el diseño de la alcantarilla del río Pita se han tomado los mismos criterios de diseño de la alcantarilla del río El Salto.

5.2.2.1 Entrada de la alcantarilla

$$m=0.385$$

Tabla 78

Cálculo del tirante de agua en la entrada del canal

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|--------|
| Caudal m ³ /s (Q) | 67,67 |
| Coefficiente de caudal m | 0,3850 |
| Ancho de canal m (b) | 7,00 |
| Altura de Agua m (H) | 3,18 |

Tabla 79

Cálculo del tirante contraído

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|-------|
| Área (m ²) | 22,25 |
| Perímetro Mojado (m) | 13,36 |
| Radio Hidráulico (m) | 1,67 |
| Velocidad (m/s) | 3,04 |
| Coefficiente de Chezy | 74,50 |
| Coefficiente de Corio lis | 1,04 |
| Hcr (m) | 2,15 |

5.2.2.2 Longitud del pozo

Tabla 80

Parámetros del pozo de agua

| Parámetro | Valor |
|------------------------|-------|
| Velocidad (m/s) | 3,04 |
| Ancho de canal (m) | 7,00 |
| Área (m ²) | 22,25 |
| h (m) | 3,00 |
| D | 0,35 |
| Ld calculado (m) | 9,74 |
| Ld asignado (m) | 9,75 |
| Yp (m) | 2,39 |
| Y1 (m) | 1,04 |
| Y2 (m) | 3,76 |

5.2.2.3 Rápida

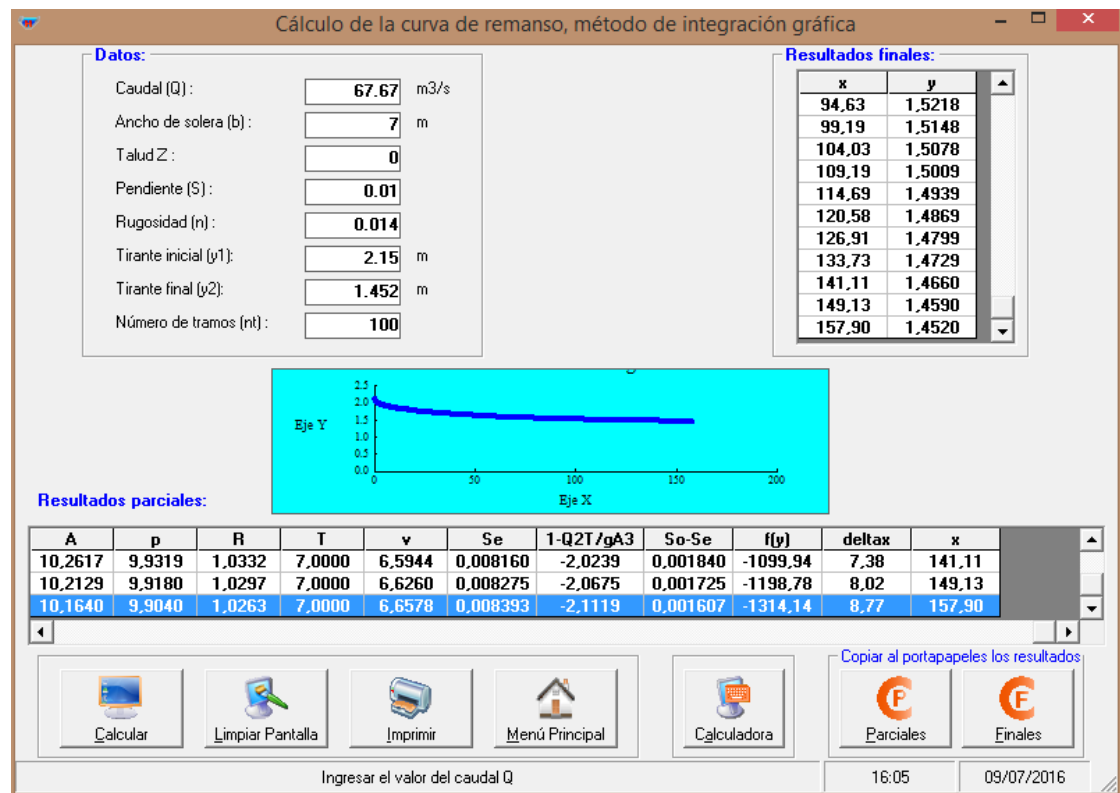


Figura 111. Curva de remanso para el río Pita

Para una longitud de 158 m, se obtiene una velocidad de 6.65 m/s, la cual es menor que la velocidad admisible para un hormigón de $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$.

5.2.2.4 Salida de la alcantarilla

Para la salida de la alcantarilla del río Pita se realizó el mismo procedimiento de la alcantarilla del río El Salto.

$$\tan \beta = 2.85 * \sqrt{\frac{\text{tirante de salida}}{\text{velocidad del flujo}}}$$

$$\tan \beta = 2.85 * \sqrt{\frac{1.45}{6.65}}$$

$$\beta = 53^\circ$$

Longitud del zampeado = 15.00 m

5.2.3 Diseño del canal de rápida con tapa y columpio

La estructura del CRTC para la presa del río Pita se diseñó de manera similar al CRTC para la presa del Río El Salto; siguiendo las recomendaciones de Mejía (2013), también se extendieron contrafuertes que servirán de soporte a la estructura del canal.

$$Q_{\text{diseño}} = 67.67 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$a = 7.35 \text{ m}$$

$$V_{\text{rap}} = 21.97 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{prom}} = 16.80 \text{ m/s}$$

Se va a colocar una estructura de CRTC, debido a que existe una sección libre de 7m, por tal motivo con los valores obtenidos se decide diseñar el CRTC. Se adoptó un espesor de paredes de la rápida de 0.25 m. Se debe

colocar hormigón de 350 Kg/cm². De esta manera se lograría cubrir la velocidad de la rápida.

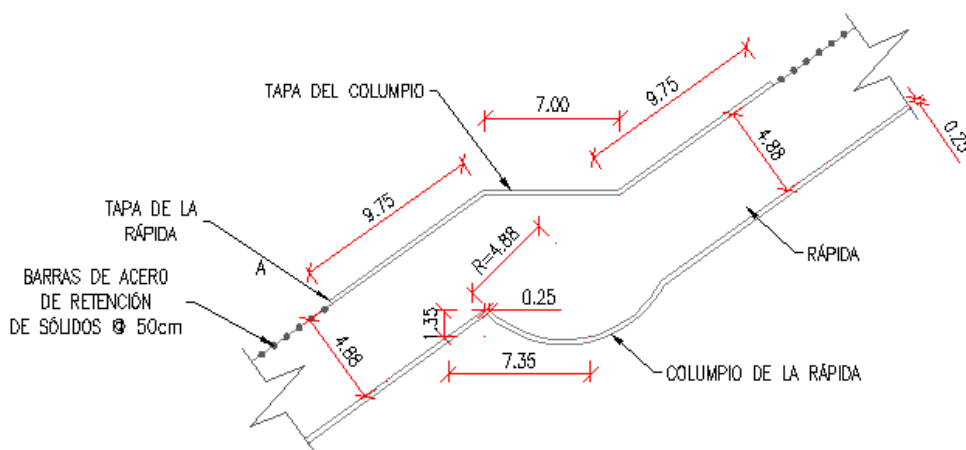


Figura 112. Canal de rápidas con tapa y columpio (Río Pita)

5.2.4 Estructura de descarga

Para hallar el ancho de la estructura de descarga del río Pita se utiliza la ecuación de Caudal de Manning y se realiza un procedimiento similar al del río El Salto.

Tabla 81

Dimensiones de la estructura de descarga para el río Pita

| Altura | Volumen del embalse (Hm ³) | Volumen del lahar (Hm ³) | Volumen excedente (Hm ³) | Q descarga (m ³ /s) | Ho (m) | m | b (m) |
|--------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|--------|------|-------|
| 45 | 27,83 | 28,78 | 0,95 | 1055,56 | 5 | 0,37 | 57,61 |

Para el ancho del vertedero de descarga de la presa del río Pita se elige una base de 62 m, puesto que satisface las condiciones requeridas.

5.3 Refuerzo mínimo para muros

Para el refuerzo mínimo horizontal se presenta la siguiente tabla recomendada por Hamsen (2002).

Tabla 82

Refuerzo mínimo horizontal de acuerdo a la distancia entre juntas

| Distancia entre juntas | Refuerzo horizontal mínimo |
|------------------------|----------------------------|
| 7-9m | 0.0025bh |
| 9-12m | 0.0030bh |
| 12-15m | 0.0035bh |
| 15-20m | 0.0040bh |

Fuente: (Hamsen, 2002)

Las juntas están a una distancia de 7-9m, como se muestran en las figuras 112 y 113, por lo tanto para el refuerzo mínimo en sentido horizontal y vertical se toma el valor de 0.0025bh distribuido en las caras interiores de la pantalla, paredes y contrafuerte.

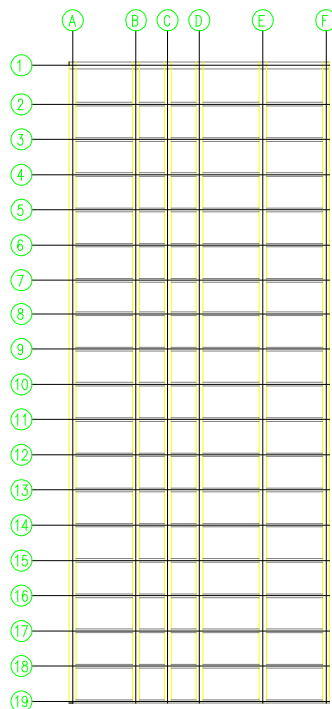


Figura 113. Vista en planta de la presa para el río El Salto

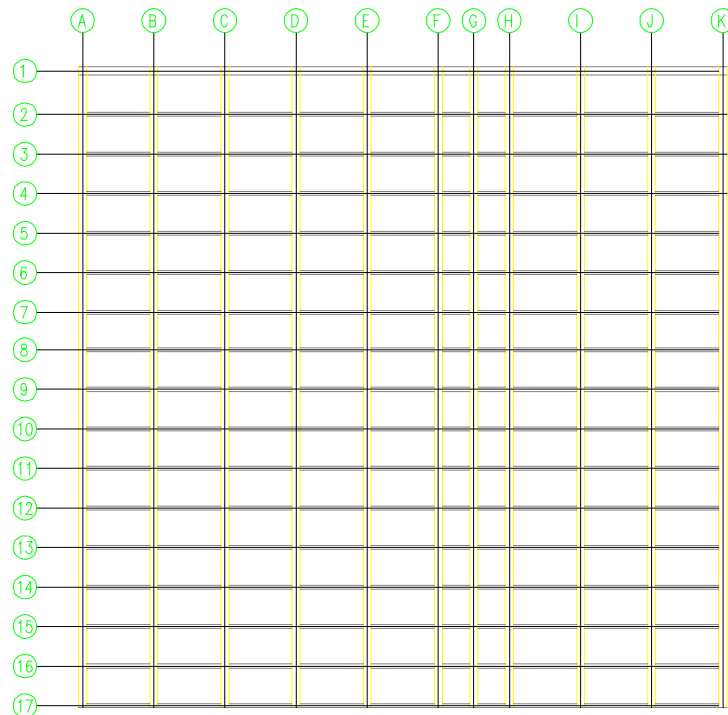


Figura 114. Vista en planta de la presa para el río Pita

Pantalla y contrafuertes

Espesor = 1m

Ancho = 1m

$$A_{v \text{ min}} = 0.0025bh$$

$$A_{v \text{ min}} = 0.0025 * 100 * 100$$

$$A_{v \text{ min}} = 25\text{cm}^2$$

Se coloca varilla \varnothing 25mm.

$$\text{Número de varillas} = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de varilla}}$$

$$\text{Número de varillas} = \frac{25\text{cm}^2}{4.90\text{cm}^2}$$

Número de varillas = 5 varillas ϕ 25mm

$$\text{Espaciamiento} = \frac{\text{Longitud de distribución}}{\text{Número de varillas}}$$

$$\text{Espaciamiento} = \frac{100\text{cm}}{5}$$

$$\text{Espaciamiento} = 20\text{cm}$$

La distribución de acero horizontal y vertical es 1 ϕ 25mm @20cm.

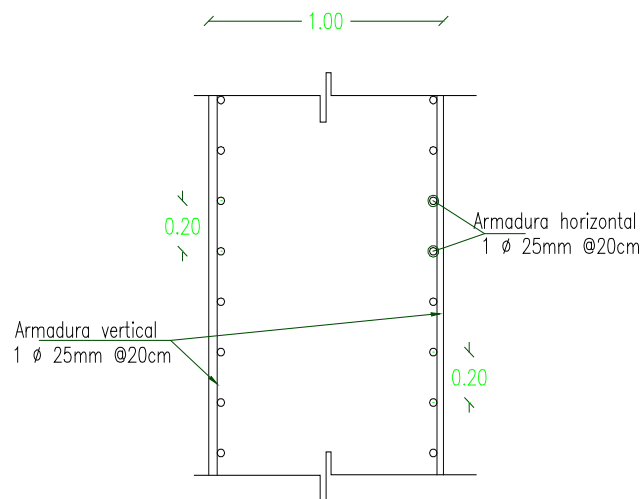


Figura 115. Corte típico de muro (Pantalla y contrafuertes)

La cantidad de varilla que se obtiene por pantalla o contrafuerte es de 20 metros por metro cuadrado.

Peso de la varilla de ϕ 25mm es de 3.85 Kg/m.

Por lo tanto el peso del acero es de 77 Kg/m².

Paredes de arriostramiento

Espesor = 1m

Ancho = 0.5m

$$A_{v \text{ min}} = 0.0025bh$$

$$A_{v \text{ min}} = 0.0025 * 50 * 100$$

$$A_{v \text{ min}} = 12.5 \text{ cm}^2$$

Se coloca varilla \varnothing 22mm.

$$\text{Número de varillas} = \frac{\text{Área total}}{\text{Área de varilla}}$$

$$\text{Número de varillas} = \frac{12.5 \text{ cm}^2}{3.80 \text{ cm}^2}$$

$$\text{Número de varillas} = 4 \text{ varillas } \varnothing 22 \text{ mm}$$

$$\text{Espaciamiento} = \frac{\text{Longitud de distribución}}{\text{Número de varillas}}$$

$$\text{Espaciamiento} = \frac{100 \text{ cm}}{4}$$

$$\text{Espaciamiento} = 25 \text{ cm}$$

La distribución de acero horizontal y vertical es 1 \varnothing 22mm @25cm.

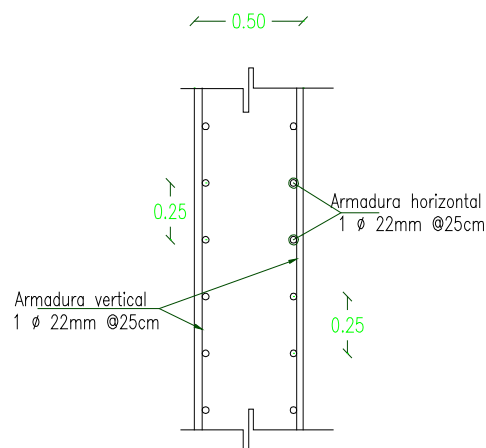


Figura 116. Corte típico de muro (Paredes de arriostramiento)

La cantidad de varilla que se obtiene por pantalla o contrafuerte es de 16 metros por metro cuadrado.

Peso de la varilla de \varnothing 22mm es de 2.99 Kg/m.

Por lo tanto el peso del acero es de 47.85 Kg/m².

En las siguientes tablas se presenta el cálculo de los metros cuadrados para la pantalla contrafuertes y paredes de arriostramiento.

Tabla 83

Áreas de pantalla y contrafuertes para la presa del río El Salto

| Eje | Área (m ²) |
|-----|------------------------|
| A | 3481,39 |
| B | 3324,55 |
| C | 3307,05 |
| D | 3307,05 |
| E | 3324,55 |
| F | 3481,39 |
| 1 | 2220,00 |
| | <u>22445,97</u> |

Tabla 84

Áreas de paredes de arriostramiento para la presa del río El Salto

| Eje | Ángulo | a | b | c | Área (m ²) |
|-----|--------|------|---|-------|------------------------|
| 2 | 45 | 65 | 5 | 60 | 2220,00 |
| 3 | 45 | 60 | 5 | 55 | 2035,00 |
| 4 | 45 | 55 | 5 | 50 | 1850,00 |
| 5 | 0 | 50 | 5 | 45 | 1665,00 |
| 6 | 30 | 45 | 5 | 45,00 | 1665,00 |
| 7 | 30 | 45 | 5 | 42,11 | 1558,19 |
| 8 | 30 | 42,1 | 5 | 39,23 | 1451,38 |
| 9 | 30 | 39,2 | 5 | 36,34 | 1344,57 |
| 10 | 30 | 36,3 | 5 | 33,45 | 1237,76 |
| 11 | 0 | 33,5 | 5 | 30,57 | 1130,95 |
| 12 | 30 | 30,6 | 5 | 30,57 | 1130,95 |
| 13 | 30 | 30,6 | 5 | 27,68 | 1024,14 |
| 14 | 30 | 27,7 | 5 | 24,79 | 917,33 |

CONTINÚA 

| | | | | | |
|----|---|------|---|-------|-----------------|
| 15 | 0 | 24,8 | 5 | 21,91 | 810,52 |
| 16 | 0 | 21,9 | 5 | 21,91 | 810,52 |
| 17 | 0 | 21,9 | 5 | 21,91 | 810,52 |
| 18 | 0 | 21,9 | 5 | 21,91 | 810,52 |
| 19 | 0 | 21,9 | 5 | 21,91 | 810,52 |
| | | | | | <u>23282,88</u> |

Tabla 85**Cantidad de acero para la presa del río El Salto**

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|---------------------------------|------------|--------|
| Área Pantalla y contrafuertes | 22445,97 | m2 |
| Área Paredes de arriostramiento | 23282,88 | m2 |
| Peso Ø 25mm | 77,00 | Kg/m2 |
| Peso Ø 22mm | 47,85 | Kg/m2 |
| Peso Total | 2842425,87 | Kg |

Tabla 86**Áreas de pantalla y contrafuertes para la presa del río Pita**

| Eje | Área (m ²) |
|-----------------|------------------------|
| A | 3339,09 |
| B | 2787,28 |
| C | 2764,11 |
| D | 2764,11 |
| E | 2764,11 |
| F | 2764,11 |
| G | 2764,11 |
| H | 2764,11 |
| I | 2764,11 |
| J | 2787,28 |
| K | 3339,09 |
| 1 | 4610,00 |
| <u>36211,54</u> | |

Tabla 87**Áreas de paredes de arriostramiento para la presa del río Pita**

| Eje | Ángulo | a | b | c | Área (m ²) |
|-----|--------|-------|---|-------|------------------------|
| 2 | 45 | 60 | 5 | 55 | 4610,00 |
| 3 | 45 | 55 | 5 | 50 | 4200,00 |
| 4 | 45 | 50 | 5 | 45 | 3790,00 |
| 5 | 0 | 45 | 5 | 40 | 3380,00 |
| 6 | 30 | 40 | 5 | 40,00 | 3280,00 |
| 7 | 30 | 40 | 5 | 37,11 | 3101,02 |
| 8 | 30 | 37,11 | 5 | 34,23 | 2864,31 |
| 9 | 30 | 34,23 | 5 | 31,34 | 2627,59 |
| 10 | 30 | 31,34 | 5 | 28,45 | 2390,88 |
| 11 | 0 | 28,45 | 5 | 25,57 | 2154,17 |
| 12 | 30 | 25,57 | 5 | 25,57 | 2096,43 |
| 13 | 30 | 25,57 | 5 | 22,68 | 1917,45 |
| 14 | 30 | 22,68 | 5 | 19,79 | 1680,74 |
| 15 | 0 | 19,79 | 5 | 16,91 | 1444,03 |
| 16 | 0 | 16,91 | 5 | 16,91 | 1386,29 |
| 17 | 0 | 16,91 | 5 | 16,91 | 1386,29 |
| | | | | | <u>42309,20</u> |

Tabla 88**Cantidad de acero para la presa del río Pita**

| Descripción | Cantidad | Unidad |
|---------------------------------|------------|-------------------|
| Área Pantalla y contrafuertes | 36211,54 | m ² |
| Área Paredes de arriostramiento | 42309,20 | m ² |
| Peso Ø 25mm | 77,00 | Kg/m ² |
| Peso Ø 22mm | 47,85 | Kg/m ² |
| Peso Total | 4812784,24 | Kg |

5.4 Presupuesto aproximado

Puesto que el proyecto de titulación de las obras protección ante el flujo de los lahares del volcán Cotopaxi para los ríos El Salto y Pita es de suma importancia es necesario presentar un presupuesto aproximado en donde se consideran los siguientes rubros principales:

- Excavación hasta la cota de cimentación.
- Material de relleno, transporte y vertido.
- Compactación de material.
- Hormigón $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$.
- Hormigón $f'c = 240 \text{ Kg/cm}^2$.
- Hormigón $f'c = 350 \text{ Kg/cm}^2$.
- Acero de refuerzo $\text{Ø}25 \text{ mm } f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$.
- Acero de refuerzo $\text{Ø}22 \text{ mm } f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$.

Los precios unitarios se tomaron de la revista Construcción de la Cámara de la Industria y Construcción del mes de Junio de 2016.

Tabla 89

Presupuesto presa mixta (Río El Salto)

| Rubro | Unidad | Cantidad | Precio U. | Precio T. |
|---|--------|------------|-----------|-------------------------|
| Excavación >6m | m3 | 50529,68 | 8,02 | \$ 405.248,03 |
| Material de relleno, transporte y vertido | m3 | 88247,77 | 2,54 | \$ 224.149,33 |
| Compactación material | m3 | 268334,22 | 8,00 | \$ 2.146.673,76 |
| Hormigón de 210 Kg/cm ² | m3 | 1020,49 | 125,82 | \$ 128.398,30 |
| Hormigón de 240 Kg/cm ² | m3 | 45728,86 | 126,67 | \$ 5.792.474,70 |
| Hormigón de 350 Kg/cm ² | m3 | 200,35 | 162,00 | \$ 32.457,35 |
| Acero de refuerzo $\text{Ø}22\text{mm } f_y=4200 \text{ Kg/cm}^2$ | Kg | 1728339,84 | 1,34 | \$ 2.315.975,39 |
| Acero de refuerzo $\text{Ø}22\text{mm}$ $f_y=4200 \text{ Kg/cm}^2$ | Kg | 1114086,03 | 1,34 | \$ 1.492.875,28 |
| | | | | <u>\$ 12.538.252,13</u> |

Tabla 90
Presupuesto presa mixta (Río Pita)

| Rubro | Unidad | Cantidad | Precio U. | Precio T. |
|--|--------|------------|-----------|------------------|
| Excavación >6m | m3 | 96117,86 | 8,02 | \$ 770.865,22 |
| Material de relleno, transporte y vertido | m3 | 168925,39 | 2,54 | \$ 429.070,50 |
| Compactación material | m3 | 2658686,80 | 8,00 | \$ 21.269.494,40 |
| Hormigón de 210 Kg/cm ² | m3 | 1081,74 | 125,82 | \$ 136.104,78 |
| Hormigón de 240 Kg/cm ² | m3 | 78520,75 | 126,67 | \$ 9.946.223,40 |
| Hormigón de 350 Kg/cm ² | m3 | 215,88 | 162,00 | \$ 34.972,56 |
| Acero de refuerzo Ø22mm fy=4200 Kg/cm ² | Kg | 2788288,81 | 1,34 | \$ 3.736.307,01 |
| Acero de refuerzo Ø22mm fy=4200 Kg/cm ² | Kg | 2024495,43 | 1,34 | \$ 2.712.823,88 |
| | | | | \$ 39.035.861,75 |

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- Se realizó un análisis exhaustivo de la topografía del área, en donde se encontró diferentes zonas cierre en las que se pueden retener la totalidad del flujo de lodo y escombros para la cuenca norte, finalmente se eligió el punto 1 para el río El Salto y el punto 3 para el río Pita.
- Ante el posible evento eruptivo del volcán Cotopaxi se ha estimado que el aporte del volumen del casquete glaciar para los ríos El Salto y Pita es del 25%, de tal manera que el volumen de lahar esperado es de 3.23 hm³ y 28.78 hm³ respectivamente.
- Al hallar los parámetros morfométricos de las cuencas hidrográficas superficiales de los ríos en estudio; se halló que la cuenca para el río El Salto tiene una forma alargada debido a que su coeficiente de compacidad es igual a 1.89, mientras que la cuenca del río Pita tiene una forma redonda a oval redonda y su coeficiente de compacidad es igual a 1.16.
- Debido al impacto de los lahares se decidió diseñar presas mixtas con relleno de materiales sueltos, las cuales tendrán la capacidad de detener y embalsar el flujo de lodo y escombros.
- Al optar por una presa mixta se reduce la cantidad de hormigón, puesto que se puede utilizar materiales de la zona y de esta manera aminorar costos de construcción.
- El caudal de diseño de la alcantarilla y la estructura de vertimiento se calculó para un periodo de retorno de 20 años, obteniendo 33.51 m³/s para el río El Salto y 67,67 m³/s para el río Pita.
- De acuerdo con la NEC para las zonas por donde fluyen los ríos El Salto y Pita y con los datos de la sísmica de refracción cumplimos con el criterio de velocidad de onda cortante. Para el caso de $V_{s30}=576.95$

m/s (Río El Salto) se encuentra dentro del rango $760 \text{ m/s} > V_s \geq 360$ y corresponde al perfil de suelo tipo C; en donde existen perfiles de suelos muy densos o roca blanda, mientras que para $V_{s30}=905.65 \text{ m/s}$ (Río Pita) se encuentra en el rango $1500 \text{ m/s} > V_s \geq 760 \text{ m/s}$ y corresponde al perfil de suelo tipo B; en donde hay roca de rigidez media.

- Con los ensayos realizados en el laboratorio de mecánica de suelos se obtuvieron las características mecánicas del suelo como ángulo de fricción interna de 42° , cohesión 0 y pesos específico de 2.20 t/m^3 para las zonas por donde fluyen los ríos El Salto y Pita.
- Los factores de seguridad al deslizamiento en condiciones extremas son 1.70 para el río El Salto y 1.70 para el río Pita, de tal manera que son mayores a 1.10 y cumplen la condición para presas de hormigón a gravedad sobre rocas.
- Los factores de seguridad obtenidos en el análisis de estabilidad de taludes pseudoestático son 1.112 y 1.125 para las presas de los ríos El Salto y Pita respectivamente y son mayores al valor recomendable de 1.1.
- El diseño del canal de rápida con tapa y columpio permite que el flujo del río tenga continuidad en su trayectoria sin disminuir el caudal aguas abajo.

6.2 Recomendaciones

- Para el relleno de la presa mixta y de materiales sueltos se recomienda utilizar el material de la zona ya que han sido utilizados en el diseño de la misma.
- Se recomienda a las autoridades competentes considerar este tipo de proyectos para ponerlos en ejecución puesto que la naturaleza es impredecible y de esta manera se podría salvaguardar vidas.
- Continuar con los diseños de las presas a nivel de estudios viales, estructurales, ambientales, geotécnicos y geológicos.

6.3 Referencias bibliográficas

- Aguilera, E., & Toulkeridis, T. (2004-2005). *El Volcán Cotopaxi, una amenaza que acecha*. Quito: Fundación FOES.
- Andrade, D., Hall, M., Mothes, P., Troncoso, L., Eissen, J. P., Samaniego, P., . . . Yepes, H. (2005). *Los peligros volcánicos asociados con el Cotopaxi*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Anónimo. (1966). *Diseño de Presas Pequeñas*. México: Continental S.A de C.V.
- Barreras flexibles de redes de anillos para la protección contra flujos de detritus. (2008). *Geobruigg Ibérica S.A.*
- Cáceres, B. (2010). Actualización del Inventarios de Tres Casquetes. *PREFALC*, 46.
- Chow, V. t. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. McGRAW HILL.
- Defaz, J. (16 de Septiembre de 2015). *CRE SATELITAL*. Obtenido de <http://www.cre.com.ec/noticia/117545/cotopaxi-presenta-incremento-de-tremores/>
- Díaz Lorenzo, J. C. (17 de Octubre de 2015). *Volcanes Fuego Eterno*. Obtenido de <https://fuegoeterno.wordpress.com/tag/volcanes-de-ecuador/>
- EcuRed*. (s.f.). Obtenido de http://www.ecured.cu/index.php/EcuRed:Pol%C3%ADtica_de_protecci%C3%B3n_de_datos
- Estudio de alcantarillas*. (2014). Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6083/10/CAPITULO%204.-ALCANTARILLAS.pdf>
- Google Earth Pro*. (2016). Obtenido de <https://www.google.es/earth/index.html>
- Google maps*. (2016). Obtenido de <https://www.google.com.ec/maps/@-0.4891302,-78.3263582,56574m/data=!3m1!1e3>
- Hansen, T. (2002). *Diseño de estructuras de concreto armado*. Perú.

- Instituto Geofísico*. (22 de Agosto de 2015). Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1147-informe-especial-volcan-cotopaxi-n-10-2015>
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2012). Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/cotopaxi>
- Jumbo, B. (13 de Noviembre de 2015). El volcán Nevado del Ruiz, que arrasó Armero en 1985, se parece al Cotopaxi. *El Comercio*.
- Lagla, A. (8 de Noviembre de 2015). EL glaciar del volcán Cotopaxi rejuvenece con cada erupción. *El Comercio*, pág. 2.
- Mejía Fernández, F. (2003). *Estructuras de vertimiento de aguas en laderas de media a fuerte pendiente*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio del Ambiente*. (2010). Obtenido de <http://suia.ambiente.gob.ec/documents/10179/242256/31+PLAN+DE+MANEJO+COTOPAXI+2.pdf/04869ae6-1b44-4b95-88c8-11e5c1b79ca2>
- Mizuyama, T. (2008). *International Journal of Erosion Control Engineering*. Obtenido de <http://www.jsece.or.jp/jece/archive/1/Mizuyama.pdf>
- Navarro, O. (2014). *Capacitación en Ingeniería de Presas*. Obtenido de <http://www.ingenieriadepresas.com.ar/www/28/31/inicio-el-primer-modulo-con-la-exposicion-de-ing-oscar-navarro>
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). En *Cragas Sísmicas - Diseño Sismo Resistente*.
- Novak, P., Moffat, A., & Nalluari, C. (2001). *Estructuras Hidráulicas*. Mc Graw-Hill Interamericana S.A.
- Ordóñez, J., Samaniego, P., Mothes, P., & Schilling, S. (2013). LAS POTENCIALES ZONAS DE INUNDACIÓN POR LAHARES EN EL VOLCÁN COTOPAXI. *Publicación Instituto Geofísico - Escuela Politécnica Nacional*.
- Ortiz Quizhpi, W. F., & Portilla Flores, E. I. (2014). Estudio de Estabilidad de los Taludes de las Presas del Proyecto Pacalorl, Teniendo en cuenta la Acción Sísmica. Cuenca, Cuenca, Ecuador.

- Periodismo Ecuador*. (29 de Julio de 2015). Obtenido de <http://periodismoecuador.com/2015/07/29/recorren-los-lahares-de-ultima-erupcion-del-volcan-cotopaxi/>
- Praga, P. (13 de Septiembre de 2008). *Zócalo Saltillo*. Obtenido de <http://www.zocalo.com.mx/seccion/articulo/vigilante-urbano-se-hunde-la-inversion-en-presa-de-gaviones>
- Presas de hormigón. (2013). *IECA*.
- Presas y Estructuras de Retención*. (s.f.). Obtenido de http://fluidos.eia.edu.co/presas/tipos_presa/paginas/p_de_roca.htm
- Ramón, P. (5 de Septiembre de 2015). *Instituto Geofísico*. Obtenido de <http://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1160-actualizacion-de-la-actividad-eruptiva-volcan-cotopaxi-n-14-2015>
- SAGARPA. (s.f.). *Presas de Gaviones*. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Documents/fichasCOUSSA/10%20Presas%20de%20gaviones.pdf>
- Sandoval, W. (2013). *Principios de la Hidráulica 2*. Politécnica.
- Sandoval, W. (2016). Obras de mitigación del flujo de lahares del Cotopaxi., (pág. 16).
- Sandoval, W. (s.f.). Presa de Arco (San Rafael).
- Secretaría de Gestión de Riesgo. (2015). *Plan de Contingencia Nacional Amenaza de Erupción del Volcán "Cotopaxi"*. Obtenido de <http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Plan%20de%20Contingencia%20Nacional%20Amenaza%20de%20Erupcion%20del%20Volcan%20Cotopaxi%20Provincias%20de%20Cotopaxi%20Napo%20y%20Pichincha.pdf>
- Suarez Diaz, J. (25 de Agosto de 2012). *SlideShare*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/SlideShare>
- Villacis, E. (s.f.).
- Volcanes de Canarias*. (2012). Obtenido de http://www.volcanesdecanarias.com/index.php?option=com_content&view=article&id=70&Itemid=117&lang=es