

**Universidad de Costa Rica  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil**

**Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde  
de Grecia**

**Proyecto de Graduación**

para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

**David Felipe Paniagua Hernández**

Director de Proyecto de Graduación:

**Ing. Rafael Oreamuno Vega, MSc.**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio**



**Autor y Comité Asesor**

  
Ing. Rafael Oreamuno Vega, MSc.  
Director

  
Ing. Alberto Serrano Pacheco, Ph.D.  
Asesor

  
Ing. Gravin Mayorga Jiménez, MSc.  
Asesor

  
Felipe Paniagua Hernández  
Estudiante

## **Derechos de propiedad intelectual**

**Fecha:** Noviembre, 2016

El suscrito, **David Felipe Paniagua Hernández**, cédula 2-0710-0426 estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B04711**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación **Análisis hidráulico e hidrológico de inundaciones en la Quebrada Valverde de Grecia**, bajo la dirección del **Ing. Rafael Oreamuno Vega, MSc.**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

**Nota:** De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos Nº 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

## **Dedicatoria**

*A las personas que dan luz a este mundo.*

## **Agradecimientos**

A Marcos Andrés Paniagua Hernández y José David Villalobos Hernández por ayudarme a obtener la topografía del cauce de la Quebrada Valverde.

A Hugo Paniagua Ramírez por conseguirme libros, mapas y documentos en la Universidad de Costa Rica.

A Christopher Leaver Ibarra por los incontables consejos que me dio sobre todo este proceso que fue el trabajo final de graduación. Fue un consejero adicional.

A Brandon Mata Ortega y a la asociación de estudiantes de topografía, que me ayudaron a manejar los datos de la estación total topográfica.

A Viviana Varela Araya por ayudarme con la redacción de este trabajo final de graduación.

A Gabriela Fernández Garza, por ayudarme a conseguir información vital para el trabajo en la biblioteca de ProDUS.

A Rafael Oreamuno Vega por ser mi profesor director y cumplir su función a cabalidad. Fue parte fundamental de este trabajo final de graduación.

A mis amigos por siempre estar ahí y ser la luz en mi vida. Ellos le dan soporte y sentido a este viaje.

## **Tabla de contenidos**

Derechos de propiedad intelectual .....	i
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Problema Específico .....	1
1.2 Importancia.....	8
1.3 Antecedentes.....	11
1.4 Objetivos.....	13
1.4.1. Objetivo General .....	13
1.4.1. Objetivos específicos .....	13
1.5 Delimitación del Problema.....	14
1.5.1 Alcances.....	14
1.5.1.1 Límites Espaciales .....	14
1.5.1.2 Límites Temporales .....	15
1.5.1.3 Límites Tecnológicos .....	16
1.5.2 Limitaciones.....	16
Capítulo 2. Marco Teórico .....	17
Capítulo 3. Caracterización de la cuenca de la Quebrada Valverde.....	18
3.1 Características generales.....	18
3.2 Caracterización Morfológica.....	22
3.3 Geología Regional .....	27
3.3.1 Grupo Aguacate .....	29
3.3.1.1 Formación La Cruz .....	30
3.3.2 Formación Lavas Intracañón .....	30
3.3.1.1 Miembro Belén.....	30
3.3.1.1 Miembro Ignimbritas Puente de Mulas .....	30
3.3.1.1 Miembro Linda Vista .....	31
3.3.3 Formación Avalancha Ardiente.....	31
3.3.3.1 Miembro Nuestro Amo: .....	31
3.3.3.2 Miembro La Caja: .....	31

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

3.3.3.3 Miembro Ignimbritas de Electriona.....	31
3.3.3 Formación Barva .....	32
3.3.3 Formación lahares y cenizas.....	32
3.4. Geomorfología .....	32
3.5. Suelo .....	33
3.5.1. Tipo de Suelo.....	33
3.5.2. Capacidad de uso de suelo.....	35
3.5.3. Uso de suelo.....	37
3.6. Caracterización del Clima .....	41
3.6.1 Zonas de vida .....	41
3.6.2. Precipitación .....	44
3.6.3 Temperatura.....	45
3.6.4 Brillo solar .....	48
3.6.5 Evapotranspiración .....	49
Capítulo 4. Precipitación .....	51
4.1 Prueba de datos dudosos.....	53
4.2 Análisis de Frecuencia.....	56
4.2.1 Estimación de parámetros probabilísticos .....	57
4.2.2. Distribuciones de probabilidad .....	59
4.2.2.1 Distribución Gumbel .....	59
4.2.2.2. Distribución Valor Extremo Generalizado .....	61
4.2.3 Prueba de bondad de ajuste.....	67
4.2.3.1 Chi Cuadrado.....	67
4.2.4 Intervalos de confianza.....	67
4.2.5 Precipitación máxima diaria estimada.....	68
4.3 Distribución espacial de precipitación .....	70
4.4 Distribución temporal de la precipitación .....	71
Capítulo 5. Modelo hidrológico.....	75
5.2. Método de transformación .....	85
5.2.1. Hidrograma unitario de Clark.....	85
5.3. Tránsito hidrológico.....	89



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

5.4. Flujo base .....	90
5.5. Hidrograma sintéticos.....	90
5.6. Resultados del modelo.....	91
Capítulo 6. Modelo hidráulico .....	93
6.1 Secciones geométricas de la Quebrada Valverde.....	93
6.1.1 Estructuras hidráulicas sobre la Quebrada Valverde.....	98
6.1.2 Longitud entre secciones de estructuras hidráulicas.....	100
6.1.3 Coeficientes de pérdidas de energía .....	100
6.1.4 Coeficiente de rugosidad Gaukler-Maning .....	100
6.2 Modelado de estructuras hidráulicas .....	103
6.3. Áreas no efectivas de flujo .....	103
6.4. Método de cálculo .....	103
6.5. Tipo de análisis de flujo .....	104
6.5. Condiciones de contorno.....	104
6.6. Resultados del modelo hidráulico.....	104
Capítulo 7. Análisis de resultados.....	107
7.1. Caracterización de la Cuenca.....	107
7.2. Análisis de Frecuencia.....	109
7.3. Análisis hidrológico.....	110
7.4. Análisis Hidráulico .....	112
Capítulo 8. Soluciones y recomendaciones.....	120
8.1. Soluciones y recomendaciones estructurales.....	120
8.1.1. Represas .....	121
8.1.2. Diques.....	121
8.1.3 Desvío de aguas.....	122
8.1.4 Lagunas o tanques de retención .....	122
8.2. Soluciones y recomendaciones no estructurales .....	123
8.2.1 Reforestación.....	124

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

8.3. Políticas y planeación urbana.....	124
8.3.1 Zonificación y ordenamiento territorial .....	126
8.4. Soluciones consideradas para la cuenca de la Quebrada Valverde.....	126
8.4.1 Diques en la Quebrada Valverde.....	126
8.4.2 Zonas inundables en las márgenes de la Quebrada Valverde.....	129
8.4.3 Instrumentación de la cuenca de la Quebrada Valverde.....	132
8.4.4 Dragado del cauce de la Quebrada Valverde.....	133
8.4.5 Políticas de protección del cauce de la Quebrada Valverde.....	134
8.4.6 Políticas de ordenamiento territorial.....	135
8.5. Soluciones para la cuenca de la Quebrada Valverde .....	135
Capítulo 9. Conclusiones y recomendaciones .....	136
9.1. Conclusiones .....	136
9.2. Recomendaciones .....	139
Capítulo 10. Referencias bibliográficas .....	140

## **Tabla de cuadros**

<b>Cuadro 1. Características físicas de la Cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>20</b>
<b>Cuadro 2. Distribución de elevaciones de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>25</b>
<b>Cuadro 3. Áreas de usos de suelo en la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>39</b>
<b>Cuadro 4. Áreas de usos de suelo corregidas en la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>41</b>
<b>Cuadro 5. Valores de parámetro Kn para la prueba de datos dudosos .....</b>	<b>54</b>
<b>Cuadro 6. Estimación de frecuencia de eventos máximos en La Argentina, Grecia.....</b>	<b>69</b>
<b>Cuadro 7. Hietograma característico de la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>74</b>
<b>Cuadro 8. Características del uso de Suelo VIIIs1e12.....</b>	<b>79</b>
<b>Cuadro 9. Características del uso de Suelo IIIe1.....</b>	<b>80</b>
<b>Cuadro 10. Clasificación de grupos hidrológicos de suelos en función de su textura y condición de drenaje .....</b>	<b>81</b>
<b>Cuadro 11. Números de curva para diferente uso de suelo y grupo hidrológico de suelo .....</b>	<b>83</b>
<b>Cuadro 12. Números de curva para los diferentes usos de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>84</b>
<b>Cuadro 13. Cálculo del número de curva ponderado total de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>85</b>
<b>Cuadro 14. Caudales pico y volúmenes de escorrentía de los hidrogramas sintéticos .....</b>	<b>92</b>
<b>Cuadro 15. Coordenadas geográficas de las secciones transversales de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>98</b>
<b>Cuadro 16. Valores de coeficientes de expansión y contracción.....</b>	<b>100</b>
<b>Cuadro 17. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 2 años.....</b>	<b>143</b>
<b>Cuadro 18. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 5 años.....</b>	<b>144</b>
<b>Cuadro 19. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 10 años.....</b>	<b>145</b>
<b>Cuadro 20. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 15 años.....</b>	<b>146</b>
<b>Cuadro 21. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 20 años.....</b>	<b>147</b>
<b>Cuadro 22. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 25 años.....</b>	<b>148</b>
<b>Cuadro 23. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 50 años.....</b>	<b>149</b>
<b>Cuadro 24. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 50 años.....</b>	<b>150</b>
<b>Cuadro 25. Valores tabulados de hidrogramas sintéticos (1) .....</b>	<b>151</b>
<b>Cuadro 26. Valores tabulados de hidrogramas sintéticos (2) .....</b>	<b>152</b>
<b>Cuadro 27. Resumen de cálculos del HEC-RAS para TR=100 años (1).....</b>	<b>154</b>
<b>Cuadro 28. Resumen de cálculos del HEC-RAS para TR=100 años (2).....</b>	<b>155</b>
<b>Cuadro 29. Resumen de cálculos del HEC-RAS para TR=100 años (2).....</b>	<b>156</b>

## Tabla de figuras

<b>Figura 1. Ciudad de Paris inundada por el Río Sena en el año 1910 .....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2. Ubicación del Cantón de Grecia.....</b>	<b>4</b>
<b>Figura 3. Proyección de la población en el cantón de Grecia hasta el año 2025 .....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 4. Imagen satelital del Cauce de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 5. Inundación de la Quebrada Valverde en la localidad el Raicero .....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 6. Inundación de la Quebrada Valverde en la localidad el Raicero (2).....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 7. Mapa de Amenazas Naturales en Grecia Occidental.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 8. Punto de Control para definir el área de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 9. Mapa de Ubicación de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 10. Distribución de Elevaciones de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 11. Mapa de Distribución de Pendientes.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 12. Histograma de frecuencias altimétricas .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 13. Curva hipsométrica de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 14. Perfil del cauce principal de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 15. Mapa geológico de la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 16. Mapa de geología de la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 17. Mapa geomorfológico de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 18. Mapa de Tipos de Uso de Suelo en la Cuenca de la Quebrada Valverde</b>	<b>34</b>
<b>Figura 19. Mapa de capacidad de uso de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 20. Mapa de Uso de Suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 21. Imagen Satelital de Uso de Suelo de la Cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 22. Zonas de Vida de Clasificación de Holdridge, en la Cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 23. Mapa de precipitación media anual de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>45</b>
<b>Figura 24. Mapa de temperatura mínima de la cuenca de la Quebrada Valverde ..</b>	<b>46</b>
<b>Figura 25. Mapa de temperatura media de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 26. Mapa de temperatura máxima de la cuenca de la Quebrada Valverde .</b>	<b>48</b>
<b>Figura 27. Mapa de horas de brillo solar de la cuenca de la Quebrada Valverde....</b>	<b>49</b>
<b>Figura 28. Mapa de ubicación de estaciones hidrometeorológicas cerca de la cuenca de la Quebrada Valverde. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 29. Prueba de datos dudosos para la estación de la Argentina en Grecia ...</b>	<b>55</b>
<b>Figura 30. Prueba de datos dudosos para la estación de la Argentina en Grecia con datos ajustados .....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 31. Intervalos de confianza con distribución VEG para la estación La Argentina, Grecia.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 32. Mapa de distribución espacial de precipitación promedio anual .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 33. Hietograma característico de la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 34. Mapa de tipo de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde .....</b>	<b>78</b>

<b>Figura 35. Mapa de Grupo hidrológico de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 36. Mapa de Isócronas de la Cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 37. Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde en HEC-HMS .....</b>	<b>91</b>
<b>Figura 38. Hidrogramas sintéticos de la cuenca de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura 39. Levantamiento de las secciones transversales en la Quebrada Valverde .....</b>	<b>94</b>
<b>Figura 40. Levantamiento de las secciones transversales en la Quebrada Valverde (2).....</b>	<b>95</b>
<b>Figura 41. Ubicación de las secciones transversales en el cauce de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 42. Ubicación de secciones para modelación de estructuras hidráulicas en HEC-RAS .....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 43. Cauce de la Quebrada Valverde (1) .....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 44. Cauce de la Quebrada Valverde (2) .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 45. Nivel de la Quebrada Valverde registrado en video de inundación. ....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 46. Modelo hidráulico de la Sección de la Quebrada Valverde en el paso hidráulico # 4. ....</b>	<b>114</b>
<b>Figura 47. Modelo hidráulico de la Sección de la Quebrada Valverde en el paso hidráulico # 5. ....</b>	<b>115</b>
<b>Figura 48. Modelo hidráulico de la Sección de la Quebrada Valverde en el paso hidráulico # 6 .....</b>	<b>116</b>
<b>Figura 49. Manchas de zonas susceptibles a inundación en las márgenes de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>119</b>
<b>Figura 50. Laguna de retención en funcionamiento .....</b>	<b>123</b>
<b>Figura 51. Ubicación de Diques en Sector Raicero (2).....</b>	<b>128</b>
<b>Figura 52. Propuesta de zonas Inundables en las márgenes del cauce de la Quebrada Valverde.....</b>	<b>130</b>
<b>Figura 53. Ubicación del paso # 9. ....</b>	<b>133</b>
<b>Figura 54. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 1 .....</b>	<b>157</b>
<b>Figura 55. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (1).....</b>	<b>158</b>
<b>Figura 56. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (2).....</b>	<b>159</b>
<b>Figura 57. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 1 (aguas arriba). .....</b>	<b>160</b>
<b>Figura 58. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 1 (aguas abajo) .....</b>	<b>161</b>
<b>Figura 59. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (3).....</b>	<b>162</b>
<b>Figura 60. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (4).....</b>	<b>163</b>
<b>Figura 61. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 2 .....</b>	<b>164</b>
<b>Figura 62. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 3 .....</b>	<b>165</b>
<b>Figura 63. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 4 .....</b>	<b>166</b>
<b>Figura 64. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 5 .....</b>	<b>167</b>
<b>Figura 65. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 6 .....</b>	<b>168</b>
<b>Figura 66. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (1).....</b>	<b>169</b>

<b>Figura 67. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (2).....</b>	<b>170</b>
<b>Figura 68. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 2 (aguas arriba).....</b>	<b>171</b>
<b>Figura 69. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 2 (aguas abajo). .....</b>	<b>172</b>
<b>Figura 70. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (3).....</b>	<b>173</b>
<b>Figura 71. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (4).....</b>	<b>174</b>
<b>Figura 72. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 7 .....</b>	<b>175</b>
<b>Figura 73. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 8 .....</b>	<b>176</b>
<b>Figura 74. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 9 .....</b>	<b>177</b>
<b>Figura 75. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (1).....</b>	<b>178</b>
<b>Figura 76. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (2).....</b>	<b>179</b>
<b>Figura 77. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 3 (aguas arriba).....</b>	<b>180</b>
<b>Figura 78. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 3 (aguas abajo). .....</b>	<b>181</b>
<b>Figura 79. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (3).....</b>	<b>182</b>
<b>Figura 80. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (4).....</b>	<b>183</b>
<b>Figura 81. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 10 .....</b>	<b>184</b>
<b>Figura 82. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 11 .....</b>	<b>185</b>
<b>Figura 83. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 12 .....</b>	<b>186</b>
<b>Figura 84. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 13 .....</b>	<b>187</b>
<b>Figura 85. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (1).....</b>	<b>188</b>
<b>Figura 86. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (2).....</b>	<b>189</b>
<b>Figura 87. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 4 (aguas abajo). .....</b>	<b>190</b>
<b>Figura 88. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 4 (aguas arriba).....</b>	<b>191</b>
<b>Figura 89. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (3).....</b>	<b>192</b>
<b>Figura 90. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (4).....</b>	<b>193</b>
<b>Figura 91. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (1).....</b>	<b>194</b>
<b>Figura 92. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (2).....</b>	<b>195</b>
<b>Figura 93. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 5 (aguas abajo). .....</b>	<b>196</b>
<b>Figura 94. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 5 (aguas arriba).....</b>	<b>197</b>
<b>Figura 95. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (3).....</b>	<b>198</b>
<b>Figura 96. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (4).....</b>	<b>199</b>
<b>Figura 97. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (1).....</b>	<b>200</b>
<b>Figura 98. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (2).....</b>	<b>201</b>
<b>Figura 99. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 6 (aguas abajo). .....</b>	<b>202</b>
<b>Figura 100. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 6 (aguas arriba).....</b>	<b>203</b>
<b>Figura 101. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (3).....</b>	<b>204</b>

<b>Figura 102. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (4).....</b>	<b>205</b>
<b>Figura 103. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 7 (1).....</b>	<b>206</b>
<b>Figura 104. Nivel de agua calculada para la sección paso # 7 (2).....</b>	<b>207</b>
<b>Figura 105. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 7 (aguas abajo). .....</b>	<b>208</b>
<b>Figura 106. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 7 (aguas arriba).....</b>	<b>209</b>
<b>Figura 107. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 7 (3).....</b>	<b>210</b>
<b>Figura 108. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 7 (4).....</b>	<b>211</b>
<b>Figura 109. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (1).....</b>	<b>212</b>
<b>Figura 110. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (2).....</b>	<b>213</b>
<b>Figura 111. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 8 (aguas abajo). .....</b>	<b>214</b>
<b>Figura 112. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 8 (aguas arriba).....</b>	<b>215</b>
<b>Figura 113. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (3).....</b>	<b>216</b>
<b>Figura 114. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (4).....</b>	<b>217</b>
<b>Figura 115. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 9 (1).....</b>	<b>218</b>
<b>Figura 116. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 9 (2).....</b>	<b>219</b>
<b>Figura 117. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 9 (aguas abajo). .....</b>	<b>220</b>
<b>Figura 118. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 9 (aguas arriba).....</b>	<b>221</b>
<b>Figura 119. Nivel de agua calculada para la sección paso # 9 (3).....</b>	<b>222</b>
<b>Figura 120. Nivel de agua calculada para la sección paso # 9 (4).....</b>	<b>223</b>
<b>Figura 121. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 14 .....</b>	<b>224</b>
<b>Figura 122. Sección propuesta para el muro dique. ....</b>	<b>225</b>
<b>Figura 123. Esquema de sistema de desfogue de aguas pluviales de las zonas inundables. ....</b>	<b>226</b>

## **Abreviaturas**

AJSM: Aeropuerto Internacional Juan Santamaría.

CIEDES: Centro de Investigación en Desarrollo Sostenible.

CNE: Comisión Nacional de Emergencias.

CONAVI: Consejo Nacional de Vialidad.

CRTM05: Sistema de Proyección Transversal de Mercator para Costa Rica.

ECG: Escuela Centroamericana de Geología

FANAL: Fábrica Nacional de Licores.

FAO: Organización para la Alimentación y la Agricultura.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

IMN: Instituto Meteorológico Nacional.

INEC: Instituto Nacional de Estadística y Censos.

ITCR: Instituto Tecnológico de Costa Rica

Lanamme: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales.

MAG: Ministerio de Agricultura y Ganadería

MED: Modelo de Elevación Digital.

NRCS: Natural Resources Conservation Service.

PRUGRAM: Proyecto de Planificación Regional y Urbana de la Gran Área Metropolitana.

SIG: Sistema de Información Geográfica.

VEG: Valor Extremo Generalizado.



## **Resumen**

Paniagua Hernández, David Felipe

Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde de Grecia

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José. C.R.:

F. Paniagua H., 2016

xxiv, 221, [69]h, ils. col. – 24 refs.

En el cantón de Grecia ha habido un desarrollo urbano descontrolado en las últimas décadas que ha aumentado la superficie impermeable del suelo. Esto ha provocado que muchas zonas sean propensas a sufrir inundaciones. Por esta razón, es necesario generar un estudio que establezca las zonas con problemas de inundaciones y proponer medidas para evitar accidentes relacionados con inundaciones.

La cuenca de la Quebrada Valverde, ha sufrido cambios en el uso del suelo y esto ha provocado cambios en la respuesta hidráulica de la quebrada. Adicionalmente, por invasiones al cauce de la quebrada, se ha modificado la capacidad hidráulica del cauce principal.

Para esto, mediante los análisis hidrológicos e hidráulicos realizados, se identifica el comportamiento de la quebrada Valverde y sus zonas con problemas de inundaciones. Con esta información, se proponen soluciones con el fin de disminuir la vulnerabilidad ante inundaciones en el margen de la Quebrada Valverde.

De este estudio se concluye que la Municipalidad debe tomar acciones para recuperar el cauce de la Quebrada Valverde. Con la autoridad política que ostenta y el plan regulador urbano, su principal herramienta para el ordenamiento territorial; debe tomar acciones en pro de la conservación de la cuenca de la Quebrada Valverde. Por otro lado se determina que no es recomendable utilizar soluciones estructurales sin antes realizar estudios más detallados que permitan conocer mejor sus efectos en el comportamiento hidráulico de la quebrada.

DESCRIPTORES CLAVE: CUENCA QUEBRADA VALVERDE, ESCORRENTIA, MODELADO HIDROLOGICO, MODELADO HIDRAULICO, INUNDACION, EVENTO EXTREMO.

Ing. Rafael Oreamuno Vega, MSc.

Escuela de Ingeniería Civil.

Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

## **Capítulo 1. Introducción**

En el presente informe se realiza un estudio hidrológico e hidráulico para determinar la vulnerabilidad ante inundaciones que tiene la Quebrada Valverde de Grecia; y se proponen medidas de prevención estructurales y no estructurales, esto con el objetivo de mejorar las condiciones hidráulicas de la Quebrada Valverde y evitar inundaciones que afecten a los vecinos de la Quebrada Valverde. Este estudio, pretende formar parte de un plan de gestión de la cuenca de la Quebrada Valverde, el cual es de interés expreso del gobierno local del cantón de Grecia.

En este estudio, se obtendrán, por medio de un análisis hidráulico de la Quebrada Valverde, las manchas de inundaciones con lo que se identificarán las zonas del cantón de Grecia que se encuentran en riesgo de inundación. Una vez identificadas las zonas vulnerables, se propondrá una serie de mejoras que disminuirán el riesgo de una eventual inundación en los márgenes de la Quebrada Valverde.

El trabajo desarrollado posee varias partes. Primero, se tiene los datos hidrometeorológicos que son el principal insumo para realizar el análisis de frecuencia. Con los resultados del análisis de frecuencia se procede con el análisis hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde, con el cual se puede conocer la demanda de transporte de la Quebrada Valverde. Como segundo componente, se tiene los datos topográficos, los cuales son de suma importancia para definir el estado actual de la Quebrada Valverde. Son el insumo que, junto a los resultados del análisis hidrológico, se procede a realizar el análisis hidráulico de la Quebrada Valverde. Por último, está el componente de propuesta de medidas estructurales y no estructurales, el cual es de suma importancia, pues es en esta parte que se define cuáles son acciones que debe llevar a cabo el gobierno local, con el fin de disminuir las probabilidades de inundación en la Quebrada Valverde.

### **1.1 Problema Específico**

Las zonas cercanas a los márgenes de los cuerpos de agua han sido durante la historia la ubicación de los asentamientos humanos más importantes. La ciudad de Roma, en Italia, es atravesada por el río Tíber. La ciudad de Londres, está atravesada por el histórico río Támesis.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

La ciudad de París, es atravesada por el río Sena. Esto se debe a que en las zonas aledañas a los ríos o quebradas, existen condiciones favorables para el desarrollo de la vida humana. En estas partes, es fácil encontrar topografía regular, o en otras palabras, planicies que facilitan los asentamientos humanos. Por otro lado, los suelos de los márgenes de los cuerpos de agua, generalmente son suelos fértiles por ser formados por los sedimentos que arrastra el cuerpo de agua. Y por último, se tiene fácil acceso al recurso hídrico, que es indispensable para el desarrollo de la vida humana y de las actividades económicas que el hombre lleva a cabo.

Sin embargo, uno de los principales problemas de los asentamientos humanos cerca de los ríos o cuerpos de agua es que son vulnerables a desbordamientos del cuerpo de agua y como consecuencia, que se genere una inundación en las ciudades. Este problema ha sido documentado en muchas ocasiones a través de la historia. A finales del año 1910, después de varios días de intensas lluvias, el río Sena inundó la ciudad de París. Los niveles del río aumentaron 8 metros sobre el nivel normal, inundando la ciudad.



**Figura 1. Ciudad de París inundada por el Río Sena en el año 1910**

Fuente: Guardian.co.uk, 2010

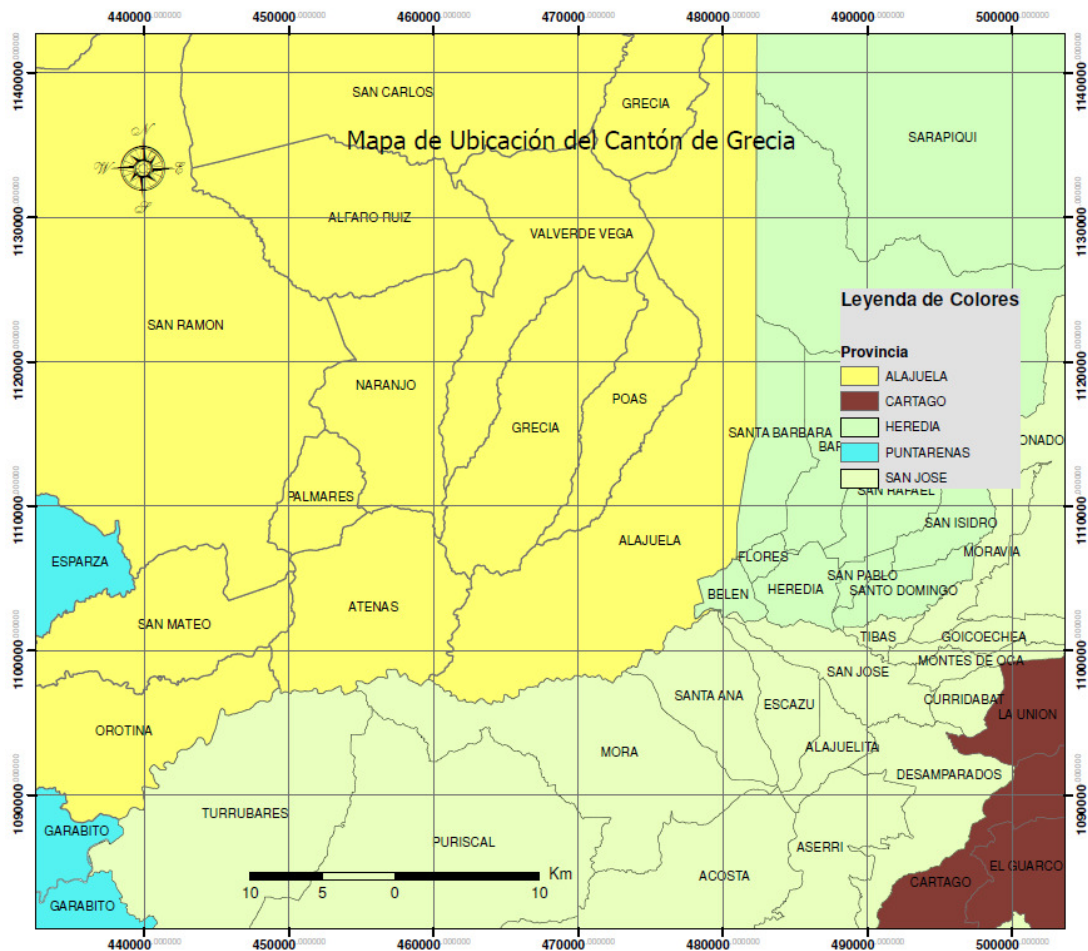
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

En la actualidad, asentamientos humanos siguen teniendo problemas con los efectos de las inundaciones de los cuerpos de agua. La fuerza inclemente de los fenómenos meteorológicos sumado a las osadas construcciones en los márgenes de los cuerpos de agua siguen generando inundaciones en las ciudades.

Costa Rica al ser un país con muchos cuerpos de agua y a tener fuertes lluvias durante el año, es propenso a tener inundaciones en las zonas urbanizadas. El cantón de Grecia se encuentra en Costa Rica, en la provincia de Alajuela, siendo este el cantón número 3 de la provincia. Se ubica al Noroeste de la ciudad de Alajuela, como se muestra en la Figura 2. Grecia posee una topografía bastante irregular. Su distrito principal, el cual lleva el nombre del cantón, se encuentra a una altura promedio de 1000 msnm; sin embargo, su punto más alto llega a los 1800 msnm, en el barrio Cajón cerca de la Reserva Forestal Bosque del Niño.

La condición de tener un terreno bastante irregular, sumada a estar ubicado en una zona donde llueve con gran regularidad, conlleva como es de esperar, a que el cantón de Grecia tenga muchos cuerpos de agua en su territorio; debido a la gran escorrentía que se produce en la superficie del cantón.

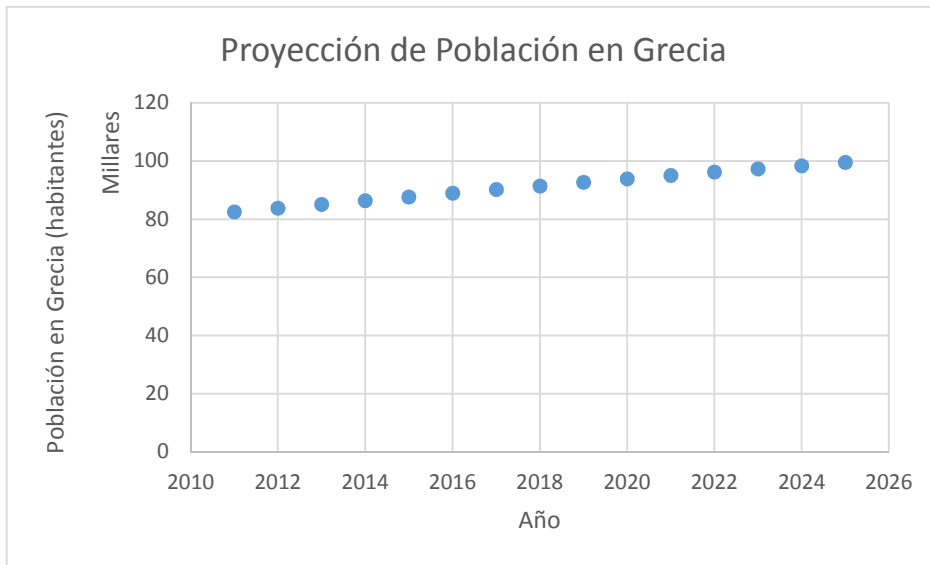
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 2. Ubicación del Cantón de Grecia**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

El cantón de Grecia ha experimentado un crecimiento poblacional significativo en las últimas décadas y seguirá en crecimiento, según lo mostrado por las proyecciones del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), como se observa en la Figura 3. Este crecimiento poblacional tiene como consecuencia un aumento de la superficie con uso urbano, lo cual tiene como resultado la impermeabilización y aumento de la escorrentía superficial. Es por esta razón que se necesita un debido control del crecimiento urbano para contrarrestar los efectos de la impermeabilización de la cuenca.



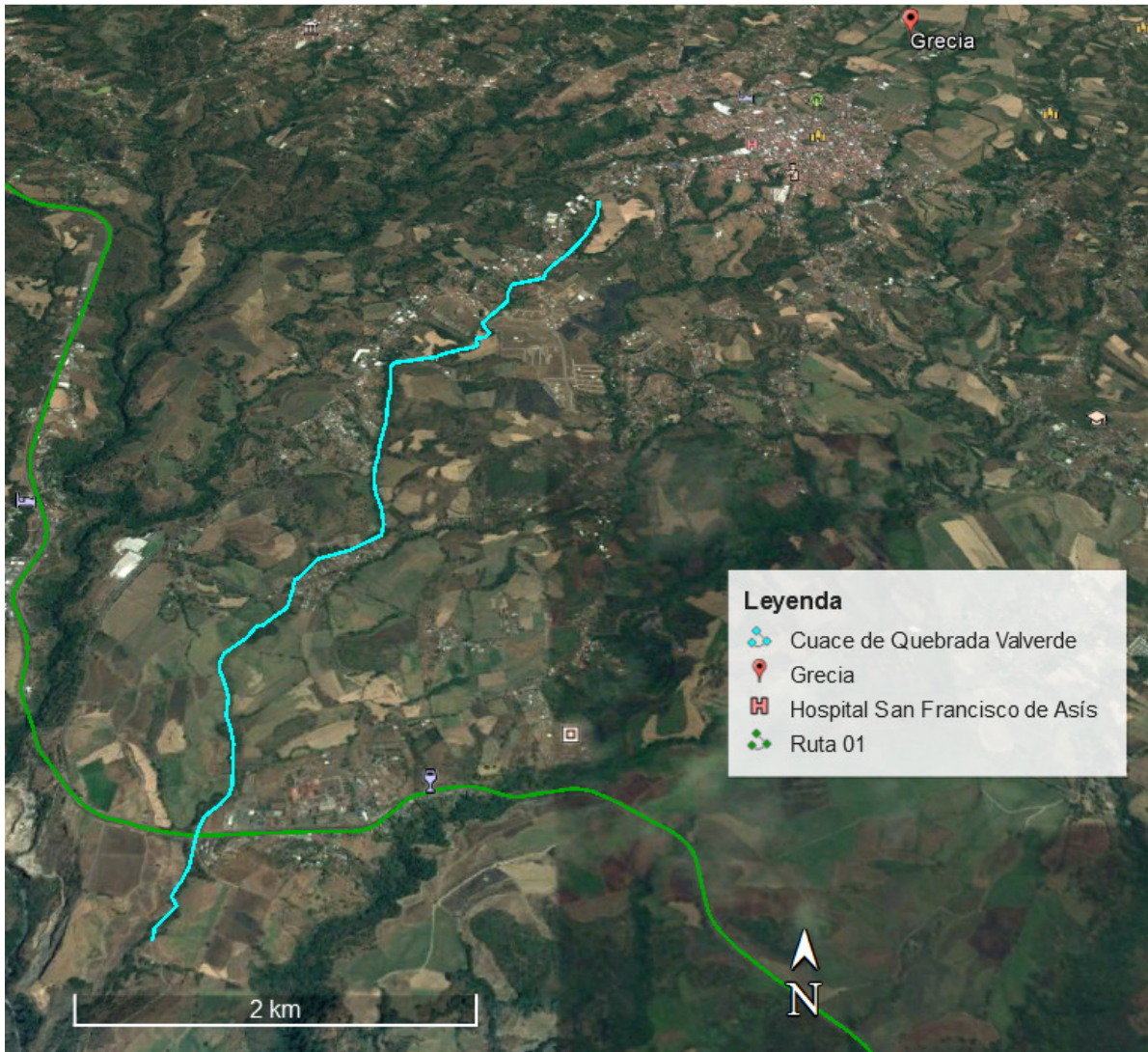
**Figura 3. Proyección de la población en el cantón de Grecia hasta el año 2025**

Fuente: Elaboración propia con datos del INEC, 2015

Sumado a esta situación, gran cantidad de construcciones se han llevado a cabo en los márgenes de los diferentes cuerpos de aguas que tiene el cantón, lo cual sin duda, ha generado problemas de capacidad hidráulica de los mismos.

Más específicamente, a lo largo del cauce de la Quebrada Valverde, existen varias edificaciones de vivienda unifamiliar, que se sospecha, están dentro del cauce de la quebrada, además de que le han cambiado el recorrido original del cauce sin ningún criterio técnico. Adicionalmente, se presume un aumento en el caudal que transporta el cauce por impermeabilización de la cuenca de la Quebrada Valverde. Una imagen satelital del cauce principal de la Quebrada Valverde se muestra en la Figura 4.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 4. Imagen satelital del Cauce de la Quebrada Valverde.**

Fuente: Google Earth, 2016

El inicio de la Quebrada Valverde se encuentra en el sur del centro urbano del distrito de Grecia, en el barrio conocido como Invu 2, y llega a cruzar la ruta nacional 01, como se observa en la Figura 4. El punto de inicio de la Quebrada Valverde tiene coordenadas CRTM05 (468628, 1113122).





**Figura 5. Inundación de la Quebrada Valverde en la localidad el Raicero**

Fuente: Municipalidad de Grecia, 2010

Por otro lado, el sistema de alcantarillado pluvial que posee la cuenca de la Quebrada Valverde y el cantón de Grecia en general, en la mayoría de los casos se encuentra deteriorado, lo cual imposibilita un adecuado manejo de las aguas pluviales de la ciudad de Grecia.

Estas condiciones han generado varios eventos de inundación en los márgenes de la Quebrada Valverde durante los últimos años, que han sido registrados por los vecinos de la quebrada y por el gobierno local. Un ejemplo de estos registros se muestra en la Figura 5 y Figura 6. Esta inundación se registró



**Figura 6. Inundación de la Quebrada Valverde en la localidad el Raicero (2)**

Fuente: Municipalidad de Grecia, 2010

## **1.2 Importancia**

Costa Rica ha aumentado significativamente los casos de inundaciones en los últimos años, como una consecuencia del crecimiento urbano sin ningún tipo de control. La impermeabilización de las cuencas aumentan la escorrentía, y en consecuencia, la vulnerabilidad ante inundaciones aumenta.

A pesar del gran peligro que esto conlleva, muchas construcciones se llevan a cabo dentro del cauce natural o zonas inundables. La falta de control y la permisividad de parte de los gobiernos locales han dado luz verde a las construcciones en estas zonas de gran peligro.

Este trabajo pretende, además de sacar a la luz el riesgo de inundación de los asentamientos que se encuentran dentro del cauce o en zonas de alto riesgo de inundación,

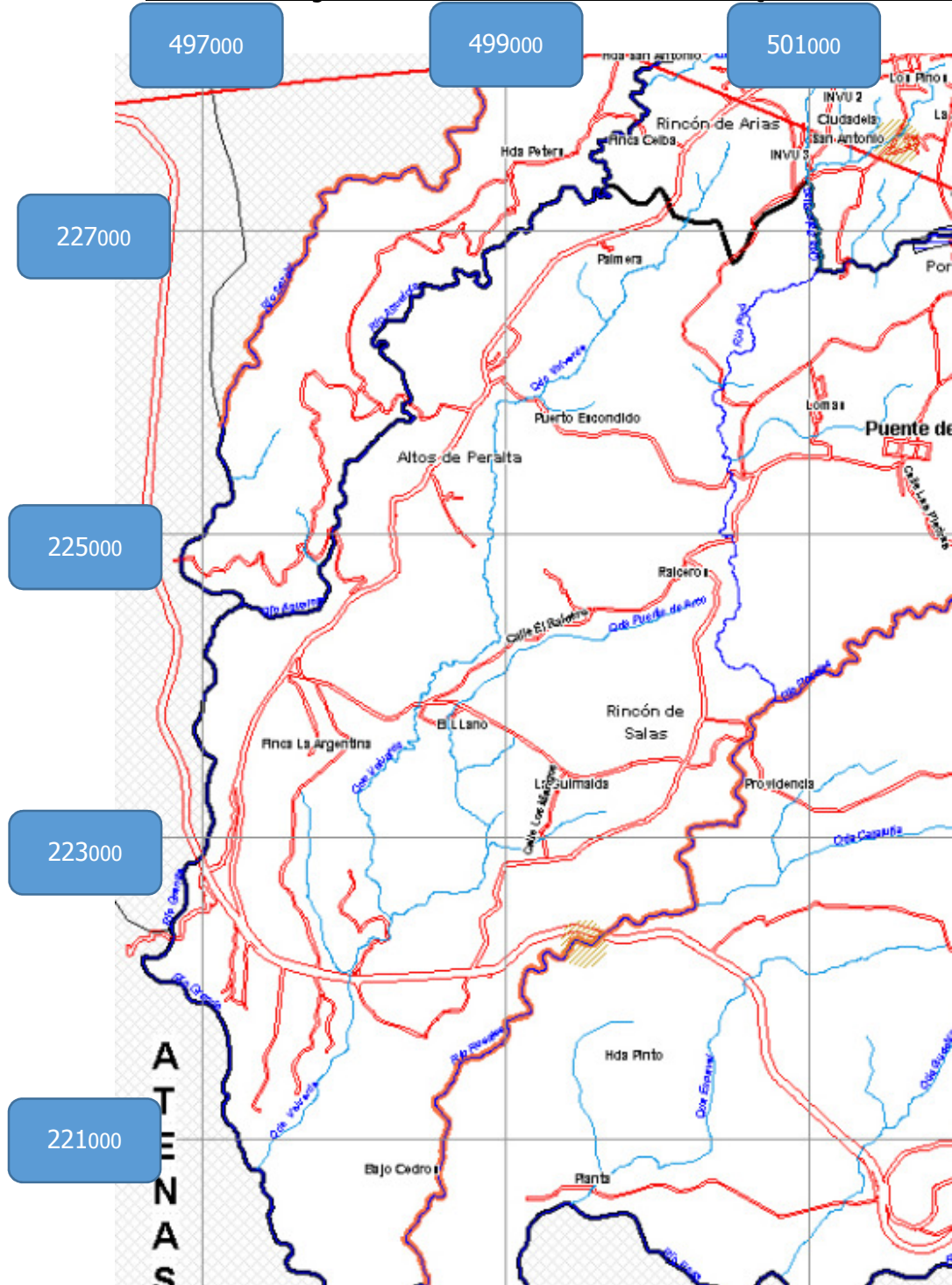
### Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

proponer soluciones a los problemas existentes en los alrededores de la Quebrada Valverde. Con estas soluciones se pretende salvaguardar la vida humana, la infraestructura del país, y mejorar la calidad de vida de los habitantes del cantón de Grecia.

Conociendo el problema latente del riesgo a una eventual inundación, las autoridades gubernamentales desconocen la magnitud y alcance del desastre natural que produciría el desborde de la Quebrada Valverde. Inclusive, en el mapa de amenazas naturales del plan regulador urbano-rural del cantón de Grecia, no se muestra la margen de la Quebrada Valverde como zona vulnerable a inundación, cuando existe registro de varias inundaciones en algunas partes de la quebrada. Parte del mapa de amenazas naturales se muestra en la Figura 7.

En el mapa de amenazas naturales del plan regulador urbano-rural del cantón de Grecia, se muestra las zonas vulnerables a inundación con color rojo. Se observa como el margen de la Quebrada Valverde no se identifica como zona vulnerable a inundación a lo largo de su cauce.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 7. Mapa de Amenazas Naturales en Grecia Occidental**

Fuente: Plan Regulador del cantón de Grecia. Elaborado por Ecoplan, 2005

Adicionalmente, este trabajo busca ser parte del plan integral de gestión de la Quebrada Valverde, estudio de gran interés para la Municipalidad de Grecia. El profesor de la Universidad

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

de Costa Rica, Rafael Murillo (2013), en su documento *Análisis sobre el estudio hidrológico, para revisión del desfogue de aguas pluviales del Proyecto de Urbanización en Condominio Montezuma*, expresa lo siguiente: "desarrollar para el cantón de Grecia una estrategia regional de control de inundaciones, un plan maestro de drenaje o un plan de manejo de aguas pluviales.", como parte de las recomendaciones de este documento; lo cual enfatiza sobre la necesidad del cantón de contar con estudios para el control de las inundaciones de los cuerpos de agua.

Aunque el alcance de este proyecto comprende el estudio de la Quebrada Valverde del cantón de Grecia, la metodología empleada en este proyecto podrá ser empleada para el análisis de inundaciones de otro cuerpo de agua con características similares pues es un proceso sistemático y repetible.

### **1.3 Antecedentes**

Entes estatales y privados han registrado, mediante fotografías y videos, eventos extremos de escorrentía en la Quebrada Valverde. Estos eventos han provocado el desborde de la quebrada poniendo en peligro la seguridad de los vecinos; además de inundaciones de hogares y daños sobre la infraestructura de la zona.

Los accidentes ocurridos a lo largo de la Quebrada Valverde, han alertado a la Municipalidad de Grecia, la cual está interesada en tomar acciones para evitar futuros problemas en las márgenes de la Quebrada Valverde.

El tema de las inundaciones en zonas urbanas, no es un problema específico de la Quebrada Valverde. En el Río Burío, se registraron varias crecidas ocurridas entre junio y noviembre del año 2007. En los cantones urbanos: San Rafael, Barva, Heredia, Flores y Belén; estas crecidas provocaron la inundación afectando a 450 casas, además de cuatro puentes caídos y varios autos destruidos según la nota de Oviedo (2007) en el periódico La Nación, el día 2 de diciembre del año 2007. Entre las principales causas del aumento de inundaciones está la acelerada transformación del uso de tierra de agrícola a residencial. Para el año 1979, solo el 28% de la superficie de los cantones de Heredia estaba dedicada a la urbanización, sin embargo, para el 2007 más del 66% de la superficie del cantón es de uso urbano o industrial.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Este cambio le resta capacidad al suelo de absorber el agua. Existen muchos otros casos de cuerpos de agua que se inundan en zonas urbanas dejando como consecuencias pérdidas económicas y daños en la infraestructura del cantón.

Por otro lado, en la investigación realizada sobre Trabajos Finales de Graduación (TFG) e informes con respecto al análisis hidráulico e hidrológico de inundaciones, se observó que no existen estudios de este tipo en la Quebrada Valverde de Grecia, únicamente se cuenta con el estudio mencionado anteriormente: *Análisis sobre el estudio hidrológico, para revisión del desfogue de aguas pluviales del Proyecto de Urbanización en Condominio Montezuma*, realizado por el Ing. Rafael Murillo Muñoz en el año 2013. Sin embargo, sí existen TFG de estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica sobre temas relacionados con control de inundaciones en diferentes quebradas y ríos del país, los cuales representan una fuente de consulta importante para esta investigación. A continuación se enlistan los TFG consultados.

1. Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Agres para el control de inundaciones, realizado por David Enrique Alfaro Jiménez en el año 2013. En esta investigación se realizó una caracterización climatológica de la cuenca del Río Agres para definir la cantidad y distribución de las lluvias presentes en la zona y con esta información se realizaron tres modelos hidrológicos e hidráulicos, considerando condiciones actuales y futuras con el objetivo de determinar si la infraestructura era capaz de controlar los eventos de precipitación y proponer medidas correctivas.
2. Estudio hidrológico e hidráulico de las inundaciones del valle de Coris, Cartago, realizado por Andrés Montealegre Alfaro en el año 2015. Este proyecto desarrolla un modelo hidrológico, un análisis morfológico fluvial y un modelo hidráulico, los cuales se utilizan como insumos para plantear qué intervenciones se recomiendan a la problemática y cuál es la priorización de las obras necesarias.
3. Análisis de recarga artificial en la cuenca del río Quebrada Seca, realizado por Roberto Villalobos Herrera en el año 2014. En este TFG se estudió la factibilidad de utilizar sistemas de recarga artificial con el fin de mitigar los efectos de las inundaciones urbanas de la cuenca de la Quebrada Seca en Heredia, Costa Rica, considerando que los sistemas de recarga artificial disminuyen la escorrentía generada por un evento de

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

precipitación y pueden resultar una solución para disminuir el problema de inundaciones considerando las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas de la cuenca.

4. Evaluación de la capacidad de transporte del Río Alajuela para el manejo de escorrentía urbana, realizado por Christopher Leaver Ibarra en el año 2014. En este proyecto, se realizó un análisis hidrológico e hidráulico para determinar la capacidad de transporte del Río Alajuela y proponer cuál debe ser el manejo adecuado del exceso de escorrentía y la mitigación de los efectos nocivos debidos a las inundaciones.
5. Análisis hidrológico e hidráulico de un sistema de evacuación de aguas pluviales de una cuenca urbana, realizado por Allan Araya Mora. Este TFG es el menos reciente de los consultados pues se elaboró en el año 2000. En esta investigación se realizó un análisis hidrológico de la cuenca de la Quebrada Barreal, utilizando la fórmula racional y la simulación hidrológica, generando caudales de diseño para periodos de retorno de 2, 5, 10 y 20 años, con lo cual se realizó una evaluación hidráulica del sistema de evacuación de aguas pluviales existente. Del análisis de la capacidad del sistema se determinaron medidas estructurales y no estructurales para mitigar los efectos de las inundaciones.

### **1.4 Objetivos**

En este apartado se describirá el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo.

#### ***1.4.1. Objetivo General***

Determinar las zonas con riesgo de inundación ante un evento de precipitación extrema y proponer mejoras con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad ante inundaciones que afecten las zonas aledañas al cauce de la Quebrada Valverde.

#### ***1.4.1. Objetivos específicos***

- Realizar una caracterización detallada de la cuenca de la Quebrada Valverde definiendo las características físicas, climáticas, de tipo de suelo y uso de la tierra de la cuenca utilizando como punto de control la intersección de la Quebrada Valverde con la Ruta Nacional 1, cerca de la Fábrica Nacional de Licores (FANAL).

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

- Realizar un análisis de frecuencia con la información hidrometeorológica fidedigna y estimar los eventos de precipitación máxima sobre la cuenca de la Quebrada Valverde.
- Determinar el comportamiento de la escorrentía en la cuenca de la Quebrada Valverde mediante un análisis hidrológico utilizando el programa computacional HEC-HMS.
- Realizar un análisis hidráulico de la Quebrada Valverde con los resultados obtenidos del análisis hidrológico utilizando el programa computacional HEC-RAS.
- Proponer mejoras y medidas preventivas lo largo del cauce de la Quebrada Valverde con base en los resultados obtenidos del análisis hidráulico para disminuir las probabilidades de inundación a lo largo de la quebrada.
- Proponer medidas preventivas de ordenamiento territorial para minimizar el daño en zonas propensas a inundaciones.

### **1.5 Delimitación del Problema**

En este apartado se define la delimitación el problema. Se comenta sobre los alcances del trabajo y los limites espaciales, temporales y tecnológicos.

#### ***1.5.1 Alcances***

En este trabajo se estudiara únicamente las inundaciones de origen fluvial, es decir, solo las inundaciones ocasionadas por eventos extremos que logren el desbordamiento del río. No se estudiará las inundaciones provocadas por deficiencias en el sistema del alcantarillado pluvial.

##### ***1.5.1.1 Límites Espaciales***

El área de interés de este estudio se limita al cantón de Grecia, más específicamente a la cuenca de la Quebrada Valverde utilizando como punto de control la intersección de la Quebrada Valverde con la Ruta Nacional 1, cerca de la Fábrica Nacional de Licores (FANAL). Este punto tiene coordenadas CRTM05 (461636, 1107480).



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 8. Punto de Control para definir el área de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

La extensión de análisis se delimita al área de la cuenca de la Quebrada Valverde utilizando el punto de control que se muestra en la Figura 8.

### *1.5.1.2 Límites Temporales*

La condición de diseño que varía con mayor velocidad durante el tiempo en este estudio es el uso de la tierra. El uso que se le da a la tierra, y por ende, su permeabilidad, varía con gran facilidad en el tiempo, y por esto se deben tomar en cuenta los cambios ocurridos hasta la fecha para implementar las soluciones que se propongan en este estudio.

La información de uso de la tierra utilizada para la cuenca de la Quebrada Valverde se fundamenta en mapas de uso de suelo del Proyecto de Planificación Regional y Urbana de la

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Gran Área Metropolitana) PRUGAM y en fotografías satelitales obtenidas del programa Google Earth en el año 2016.

### *1.5.1.3 Límites Tecnológicos*

Este proyecto requiere de información topográfica, geográfica e hidrometeorológica; y la calidad de los resultados depende de la precisión y exactitud de la información que se utilice para el análisis hidrológico e hidráulico. En Costa Rica existe una deficiencia tecnológica en las mediciones hidrometeorológicas, lo cual no permite un completo y correcto registro para realizar este tipo de análisis. Por otro lado, no se cuenta con radares meteorológicos que permitan un análisis detallado del comportamiento espacial y temporal de las tormentas, lo que imposibilita conocer el patrón de escorrentía sobre la cuenca de la Quebrada Valverde.

### **1.5.2 Limitaciones**

No existe una estación fluviográfica en la Quebrada Valverde. No existen registros de los caudales en la zona de estudio, por lo que se desconoce de los caudales que pasan por la Quebrada Valverde. Esta limitante, nos condiciona a no poder revisar los resultados de caudales obtenidos de los hidrogramas sintéticos, ni tampoco realizar una calibración del modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde.

## **Capítulo 2. Marco Teórico**

Inundación es el término que se utiliza para definir el fenómeno que ocurre cuando el nivel de un cuerpo de agua aumenta, provocando de esta manera que se sumerjan zonas de tierra que usualmente están secas. Según *Directive of the European Parliament and of the Council* (2007), una inundación se define como: "Ocupación de agua de una superficie de tierra que normalmente no está cubierta de agua".

Las inundaciones son eventos que ocurren de manera natural. Los ríos se inundan cuando hay eventos extremos de precipitación que generan una escorrentía capaz de superar la capacidad de transporte del cuerpo de agua, teniendo como consecuencia el aumento del nivel del agua.

Las planicies de inundación o llanuras aluviales son la zona junto a las márgenes de los cuerpos de agua. En un evento de precipitación extremo sobre la cuenca del cuerpo de agua, las planicies de inundación o llanuras aluviales se inundan, controlando el flujo excesivo producido por el evento extremo.

Durante la historia, la humanidad ha preferido asentarse en zonas cercanas a los ríos, por varias razones: zonas generalmente planas que facilitan la construcción de infraestructura, suelos fértiles que permiten el desarrollo agrícola, y accesibilidad que se tiene al imprescindible recurso hídrico. A causa de esto, se interfiere en las zonas inundables, provocando el aumento del riesgo de un desastre natural en los asentamientos debido a una inundación.

### **Capítulo 3. Caracterización de la cuenca de la Quebrada Valverde**

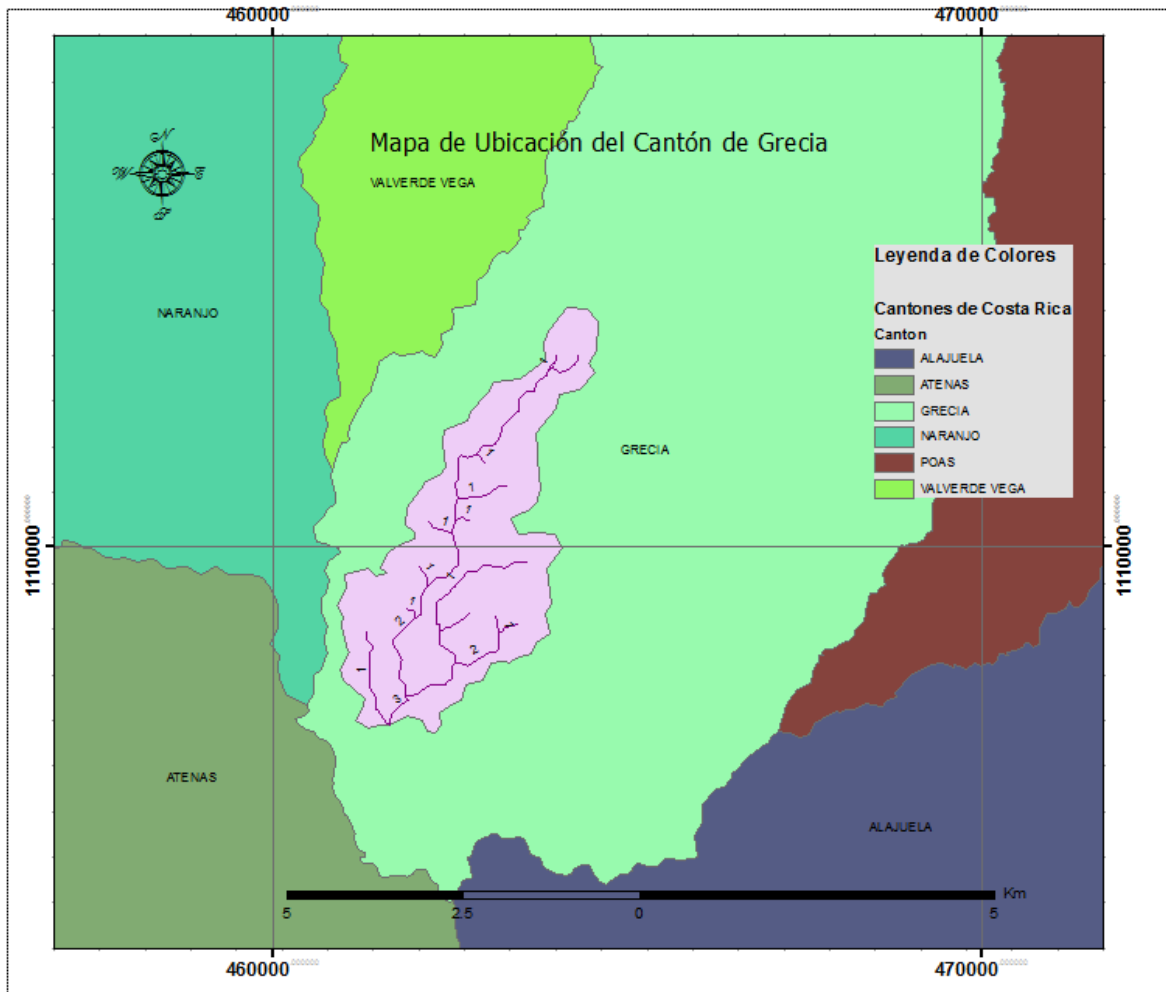
En este capítulo, se realizara un estudio detallado de las características físicas y geomorfológicas de la cuenca de la quebrada Valverde.

#### **3.1 Características generales**

Para la delimitación de la cuenca de la Quebrada Valverde se utiliza como punto de control el paso de la Quebrada Valverde bajo la Ruta Nacional 1, en las coordenadas CRTM05 (461636, 1107480) cerca de la FANAL. La cuenca de la Quebrada Valverde se extiende en gran parte del cantón de Grecia. Inicia en la parte Sur del centro del cantón, en el barrio de Rincón de Arias y desemboca en el rio Agualote, en el distrito de Puente Piedra, el cual posteriormente se une al Rio Colorado.

La cuenca de la Quebrada Valverde se ubica dentro de la hoja cartográfica 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) Naranjo y su área se encuentra en los distritos Grecia y Puente Piedra del cantón de Grecia. En la Figura 9 se muestra la ubicación de Quebrada Valverde respecto al cantón de Grecia y sus vecinos Valverde Vega, Naranjo, Atenas, Poás y Alajuela.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 9. Mapa de Ubicación de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

Para la caracterización física de la cuenca de la Quebrada Valverde se utiliza el programa computacional de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS. Como primer paso, se construye un modelo de elevaciones digital (MED). El MED se elabora a partir de las curvas de nivel obtenidas de las hojas 1:10,000 del Proyecto de Planificación Regional y Urbana de la Gran Área Metropolitana (PRUGAM) del Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. Los resultados de las características físicas de la Quebrada Valverde se muestran en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Características físicas de la Cuenca de la Quebrada Valverde**

<b>Cuenca de la Quebrada Valverde</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Área	km <sup>2</sup>	9,95
Perímetro	km	18,37
Longitud del cauce principal	km	8,21
Índice de Compacidad (Gravelius)	adimensional	1,63
Factor de Forma	adimensional	0,15
Altura máxima	m.s.n.m	958
Altura mínima	m.s.n.m	670
Altura media	m.s.n.m	809
Altura mediana	m.s.n.m	752
Altura de frecuencia media	m.s.n.m	782
Pendiente promedio de la Cuenca	%	25,14%
Pendiente promedio del Cauce Principal	%	2,29%
Orden de la Cuenca	und	3
Longitud Total de Red Hídrica	km	16,38
Densidad de drenaje	km	1,6

El índice de compacidad o índice de Gravelius, es una medida de la irregularidad de la geometría de la superficie de la cuenca. Entre mayor es el coeficiente de Gravelius, mayor irregularidad presenta la forma de la cuenca. Una cuenca con una geometría parecida a un círculo, tendrá un coeficiente de Gravelius cercano a 1. Por lo contrario, un valor del índice de compacidad o índice de Gravelius mayor a 1 indica una cuenca de forma irregular y alargada. La cuenca de la Quebrada Valverde, posee un valor de índice de Gravelius de 1,63, es decir, una cuenca con forma medianamente alargada y que captará la precipitación de una tormenta de una manera medianamente eficiente. El índice de Gravelius se calcula con la siguiente formula:

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde,

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

- $K_c$  es el índice de Gravelius.
- $A$  es el área de la cuenca.
- $P$  es el perímetro de la cuenca.

Por otro lado, el factor de forma es la relación entre el ancho medio y la longitud axial de la cuenca. La longitud axial de la cuenca se toma como la longitud del cauce principal. Una cuenca con un factor de forma bajo, indica una cuenca de forma alargada, mientras que un valor alto, indica una cuenca de forma semejante a la de un círculo. Una cuenca alargada, o en otras palabras, con un factor de forma bajo, es menos vulnerable a crecientes que una otra cuenca del mismo tamaño pero con un factor de forma mayor, esto debido que es menos probable a tener una tormenta sobre toda la extensión de la cuenca. El factor de forma de la Quebrada Valverde es de 0,15, lo que quiere decir que es de forma medianamente alargada. El factor de forma se calcula con la siguiente formula:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Donde,

- $K_f$  es el índice de forma.
- $A$  es el área de la cuenca.
- $P$  es la longitud axial de la cuenca.

Como se detalló anteriormente, tanto el índice de compacidad como el factor de forma, nos indican que la cuenca de la Quebrada Valverde es medianamente alargada. La consecuencia de tener esta forma, es ser medianamente susceptible a crecientes. Es importante recalcar que estos factores predicen el comportamiento de la cuenca de una manera general, pues la respuesta hidrológica depende de otras características como el tipo de suelo y la topografía de la cuenca.

La elevación media es aquella para la cual el 50% del área de la cuenca se encuentra a una elevación menor. La elevación media de la cuenca de la Quebrada Valverde es de 809 m.s.n.m.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Los valores de pendiente media y pendiente del cauce principal, indican que la cuenca de la Quebrada Valverde posee una topografía medianamente regular, es decir, no posee pendientes grandes (mayores al 20%). En la Figura 11 se observa un mapa de distribución de pendientes, donde se le asigna un color a un rango de pendientes. De esta figura, se observa que las pendientes que predominan en la cuenca de la Quebrada Valverde son las que van desde 0% a 10%.

La densidad de drenaje se define como la relación entre la longitud total de los cuerpos de agua de la cuenca y el área total. La densidad de drenaje se calcula con la siguiente fórmula:

$$D_d = \frac{L}{A^2}$$

Donde,

- $D_d$  es la densidad de drenaje.
- $L$  es la longitud total de los cuerpos de agua de la cuenca.
- $A$  es el área total de la cuenca.

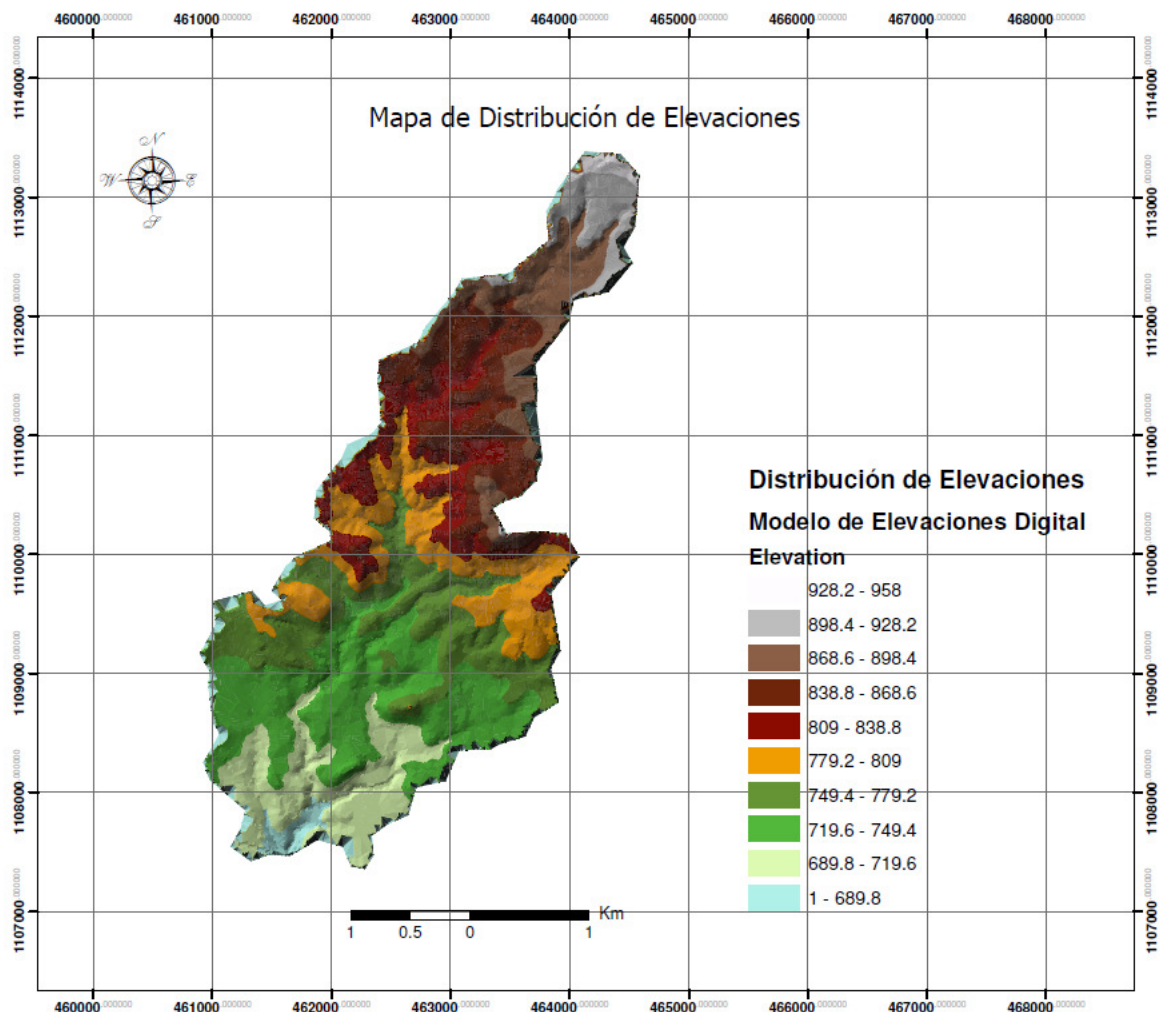
Entre mayor sea la densidad de drenaje de una cuenca, mejor es su respuesta y evacua más rápidamente la precipitación de una tormenta. En el caso de la Quebrada Valverde, se tiene una densidad de drenaje de 1,6 km/km<sup>2</sup>, lo que significa que posee una respuesta hidrológica medianamente pobre.

### **3.2 Caracterización Morfológica**

Se utilizarán mapas generados mediante el programa computacional ArcGIS para estudiar la forma de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se entra en detalle de cómo se distribuye las alturas y pendientes en el área de la cuenca de la Quebrada Valverde. En la Figura 10 se muestra un mapa de distribución de alturas. Se observa que la altura máxima de la cuenca es de 958 m.s.n.m y la altura mínima de 670 m.s.n.m.



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

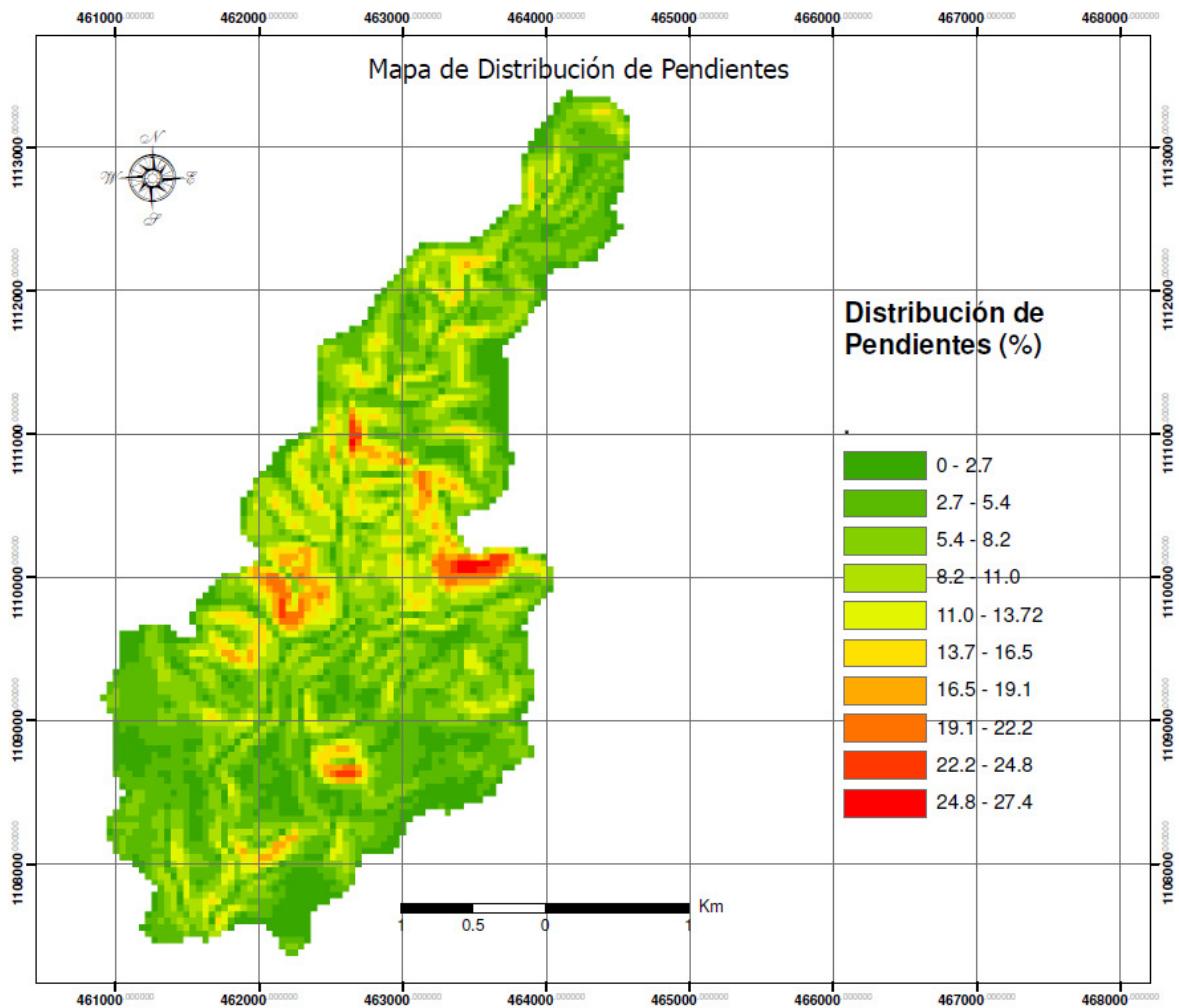


**Figura 10. Distribución de Elevaciones de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

En la Figura 11, se observa un mapa de distribución de pendientes de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se observa cómo la pendiente máxima de la cuenca de la Quebrada Valverde es de aproximadamente 27%. No obstante, las pendientes fuertes son poco frecuentes a lo largo y ancho de la cuenca. Mientras que las pendientes que van entre 0%-11% son las más frecuentes. Considerando lo anterior, se puede observar que las pendientes de la cuenca de la Quebrada Valverde son, en su mayoría, pequeñas (entre 0%-11%).

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 11. Mapa de Distribución de Pendientes**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

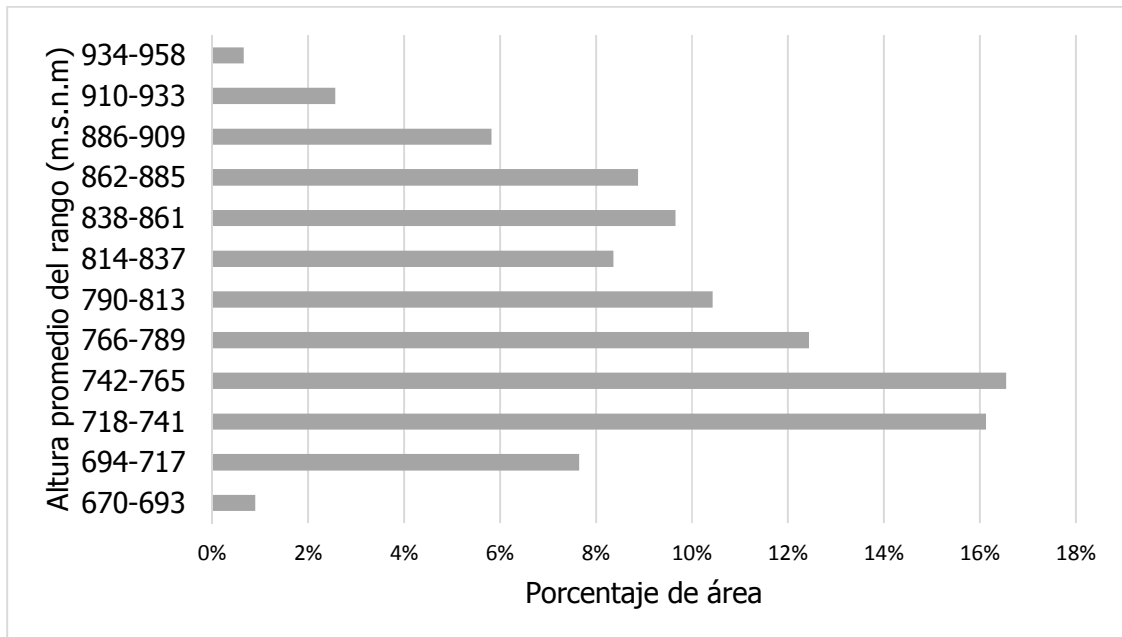
La información de distribución de las elevaciones en la cuenca de la Quebrada Valverde, con la cual se confecciona el mapa de distribuciones de pendientes que se muestra en la Figura 11, se muestra en el Cuadro 2.

**Cuadro 2. Distribución de elevaciones de la cuenca de la Quebrada Valverde**

<b>Elevación (msnm)</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje del Área Total (%)</b>
670-693	0,09	0,89%
694-717	0,76	7,65%
718-741	1,60	16,13%
742-765	1,65	16,54%
766-789	1,24	12,43%
790-813	1,04	10,43%
814-837	0,83	8,36%
838-861	0,96	9,65%
862-885	0,88	8,88%
886-909	0,58	5,82%
910-933	0,25	2,56%
934-958	0,07	0,66%

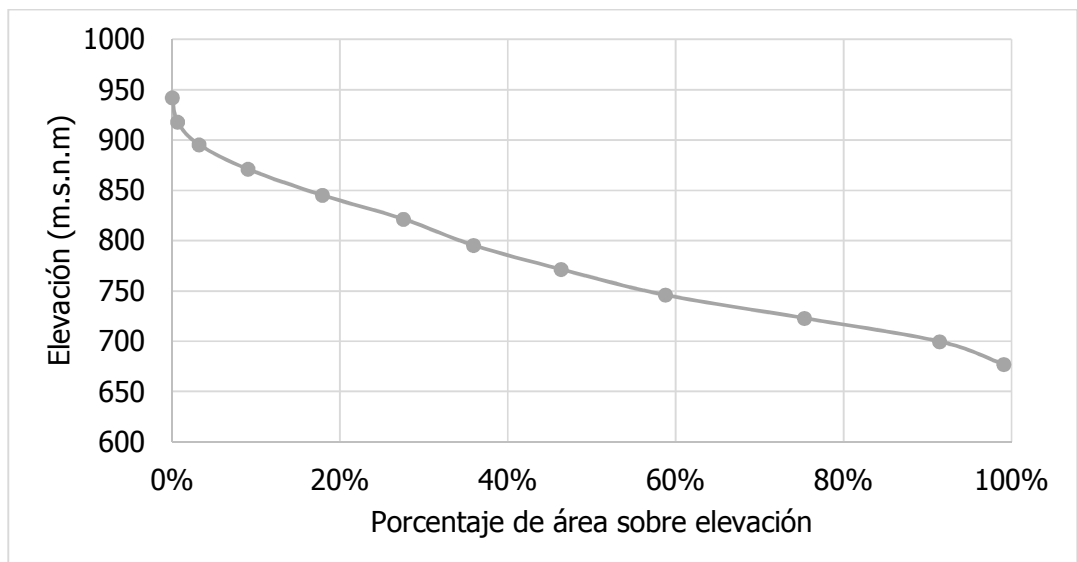
Con la información del Cuadro 2, se obtiene el histograma de frecuencias altimétricas. Este histograma, se muestra en la Figura 12. Del histograma se observa que aproximadamente un 33% del área de la cuenca de la Quebrada Valverde se encuentra entre alturas de 718m.s.n.m y 765m.s.n.m, siendo las alturas más frecuentes en la cuenca de la Quebrada Valverde. Por otro lado, las alturas menos frecuentes son las alturas más bajas, entre 670m.s.n.m y 693m.s.n.m.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 12. Histograma de frecuencias altimétricas**

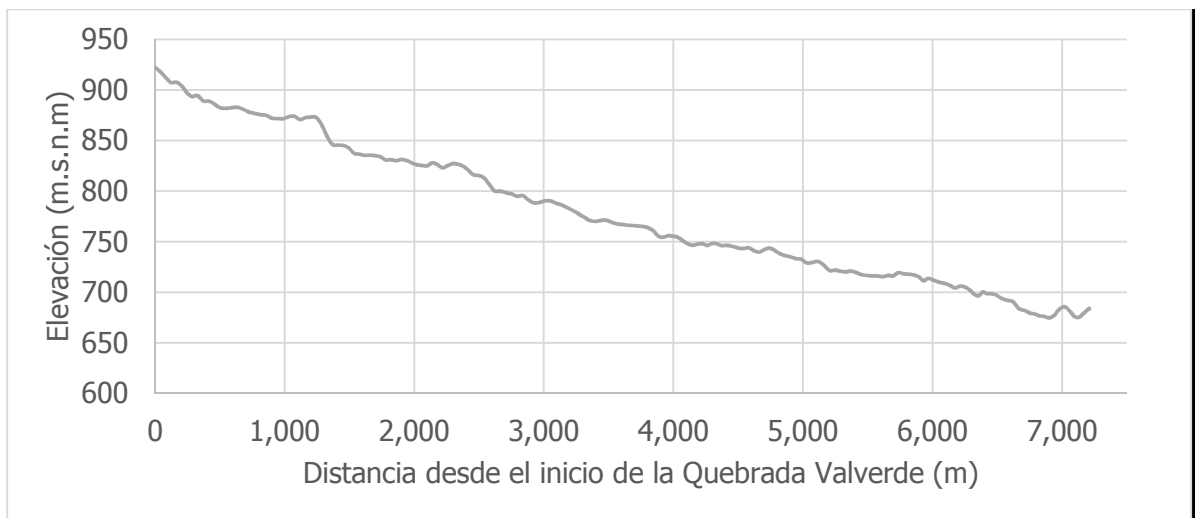
Con la información del Cuadro 2, se obtiene la curva hipsométrica. Esta curva se muestra en la Figura 13. De la curva hipsométrica, se observa como la cuenca de la Quebrada Valverde tiene una pendiente aproximadamente constante en su extensión. Y se observa también, cómo aproximadamente el 50% de la cuenca se encuentra debajo de la elevación 752 m.s.n.m.



**Figura 13. Curva hipsométrica de la Quebrada Valverde**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

El perfil de elevaciones del cauce principal de la Quebrada Valverde se muestra en la Figura 14. En esta figura, se observa cómo la pendiente del cauce se mantiene aproximadamente constante a lo largo del tramo de análisis. La pendiente promedio del cauce principal es de 3,5%. Es importante también, conocer como varia la pendiente a lo largo del cauce principal de la quebrada, pues es un factor que determina la ubicación de las secciones transversales para el análisis hidráulico.



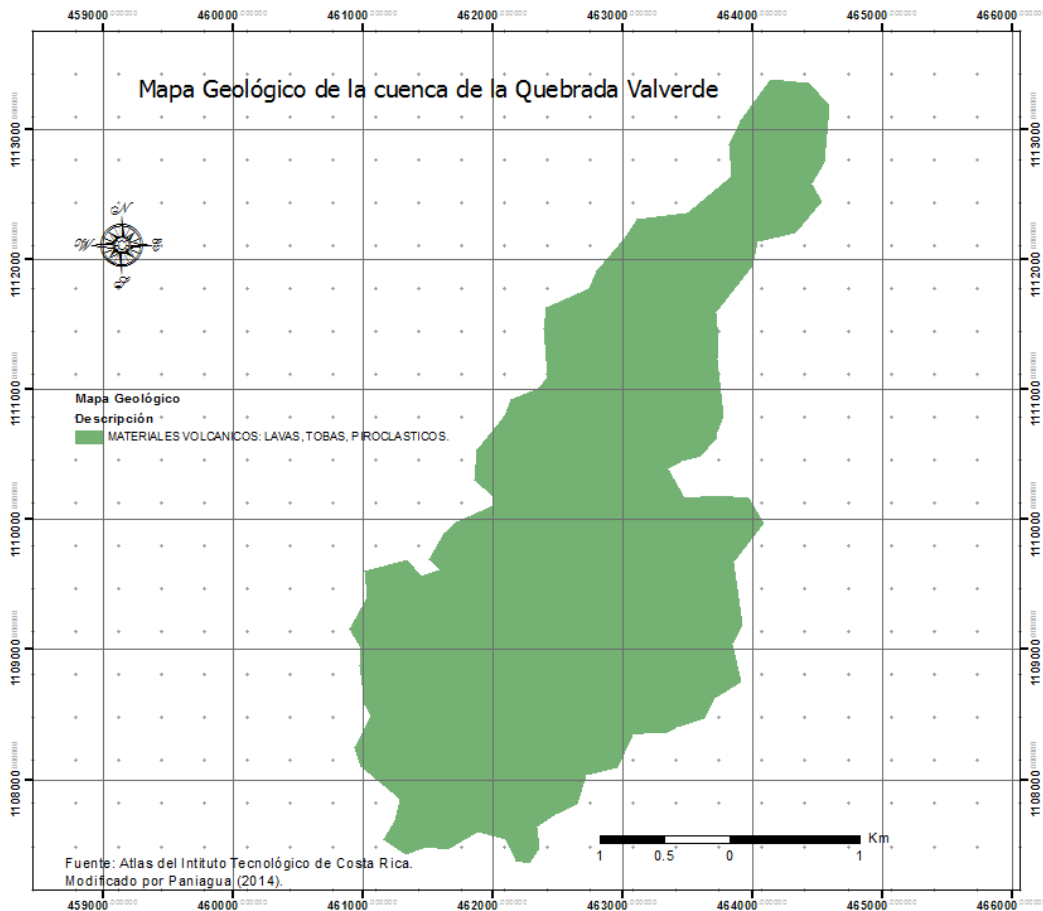
**Figura 14. Perfil del cauce principal de la Quebrada Valverde**

### **3.3 Geología Regional**

La caracterización regional de la cuenca de la Quebrada Valverde se realiza mediante mapas confeccionados con el programa computacional ArcGIS. Estos mapas utilizan información de la Escuela de Geología de la Universidad de Costa Rica e información del Atlas Digital del Instituto Tecnológico de Costa Rica del año 2014.

En la Figura 15 se muestra el mapa de información geológica de la cuenca de la Quebrada Valverde. El estado geológico de la cuenca de la Quebrada Valverde está conformado por edificios volcánicos recientes y se puede encontrar materiales volcánicos, lavas, tobas, piroplásticos. También es importante recalcar que este mapa es muy general y toda la cuenca de la Quebrada Valverde solo tiene una categoría.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

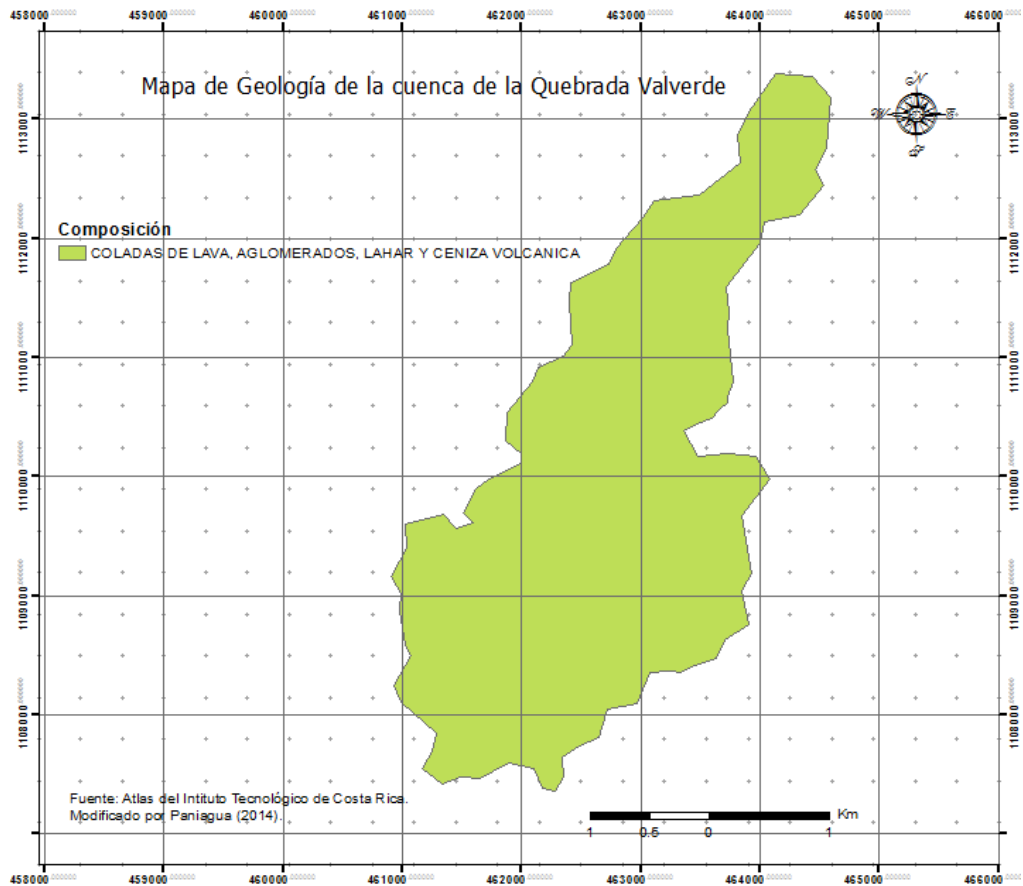


**Figura 15. Mapa geológico de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

En la Figura 16, se muestra el mapa de geología de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se muestra cómo la geología de la cuenca de la Quebrada Valverde está compuesta por coladas de lava, aglomerados, lahar y ceniza volcánica. La estratigrafía se compone de rocas volcánicas intrusivas someras. La edad de formación de la geología es el periodo cuaternario. Al igual que la figura anterior, el mapa es muy general y toda la cuenca de la Quebrada Valverde solo tiene una categoría.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 16. Mapa de geología de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR ,2014. Modificado por Paniagua, 2016

En la Figura 15 y Figura 16, se muestra mapas del Atlas Digital de Instituto Tecnológico de Costa Rica. Estos mapas, como se mencionó anteriormente, son muy generales y poseen información muy gruesa sobre la geología de la cuenca de la Quebrada Valverde. Por tanto, se investigan otras fuentes que entren más en detalle sobre la geología de la cuenca de la Quebrada Valverde. Para esto se utiliza el estudio de caracterización geológica en la zona sureste del cantón de Grecia, realizado por la Escuela Centroamericana de Geología (Mora, 1995), en el cual se enumeran los principales grupos geológicos encontrados en la zona y su descripción. Estos grupos geológicos se discuten a continuación.

### ***3.3.1 Grupo Aguacate***

El grupo aguacate, está compuesto por dos formaciones, las cuales se muestran a continuación

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

### *3.3.1.1 Formación La Cruz*

Compuesta por coladas de basalto y leucobasalto con espesores promedio entre de 20-30 m y tobas intercaladas de colores rojos y violáceos con estratificación centimétrica. El tamaño de grano es de arena media a fina hasta limo y se presenta en paquetes que rara vez sobrepasan los 10m. La forma es tubular y a veces algo acuñada con espesores que alcanzan hasta 1500 m (Mora, 1995).

### *3.3.1.2 Formación Grifo Alto*

Está compuesta por: 1- lavas andesíticas con augita y/o hipersteno; los colores son grises y también rojizos (es posible encontrar basaltos y dacitas en afloramientos pequeños); 2- los flujos piroclásticos a veces son gruesos y contienen bloques lévicos y escoriáceos decimétricos angulares normalmente y raras veces redondeados. La matriz es lodosa y se encuentra "cocinada" dando evidencia de depositación caliente; 3- ignimbritas de color gris que agrandan hacia el techo a tobas blanquecinas. Dichos autores incluyen algunas zonas silicificadas dentro de la formación (Mora, 1995).

### ***3.3.2 Formación Lavas Intracañón***

También conocida como formación Colima. Son lavas andesíticas, a veces vesicualres. Se encuentran dispuestas en capas de 10 a 30 metros de espesor, intercaladas con tobas y algunas brechas. Son lavas andesíticas que contienen dos tipos de piroxenos las cuales corresponden a los flujos inferiores y andesitas áfricas. Esta formación se divide en tres miembros (Echandi, 1981):

#### *3.3.1.1 Miembro Belén*

Consiste en lavas andesíticas, proxénicas, algunas transicionales, cuatro andesitas y basaltos. Estas lavas se encuentran interrumpidas por mantos de cenizas. (Mora, 1995).

#### *3.3.1.1 Miembro Ignimbritas Puente de Mulas*



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Son de color gris oscura a café, compuesta por fragmentos lapílicos rodeados de una matriz soldada y con estructura columnar algo desarrollada. Esa unidad presenta una parte inferior tobácea (Mora, 1995).

### *3.3.1.1 Miembro Linda Vista*

Constituido por brechas lávicas, con un núcleo central denso. La localidad tipo es el Tajo Colimnas (en el puente sobre el Río Virilla, entre Santo Domingo y Tibás). En este tajo, un núcleo denso de lavas andesíticas con estructuras de flujo está entre dos brechas lávicas color rojizo y deleznales. Hacia el techo finaliza con una escoria negra muy vesicular.

### **3.3.3 Formación Avalancha Ardiente**

Echandi (1981), la llama como formación Tiribí, constituida por depósitos de pómez de caída, seguido por flujos de ceniza, lapilli y bloques; ignimbritas grises con fiamez de obsidiana y pómez y depósitos de caída en la parte superior. Echandi (1981) divide la formación Avalancha Ardiente en tres miembros, los cuales se detallan a continuación:

#### *3.3.3.1 Miembro Nuestro Amo:*

Constituida por tobas con fragmentos de composición heterogénea, lavas y escorias de diferente tamaño, en una matriz tobácea densa, masiva y muy dura.

#### *3.3.3.2 Miembro La Caja:*

Compuesto por tobas e ignimbritas poco soldadas y masivas con matriz cenicienta a arenosa, con algunos fragmentos de lavas.

#### *3.3.3.3 Miembro Ignimbritas de Electriona*

Compuesto por ignimbritas típicas muy soldadas, con bastante vidrio negro, basdeamiento horizontal, fiames y pómez, colapsados en una matriz vidriosa densa y dura. En las partes superior e inferior, la ignimbrita es menos densa y contiene menos vidrio y más pómez.

### ***3.3.3 Formación Barva***

También se le conoce como formación Andesitas Poás. Esta formación está constituida por coladas de lavas andesíticas y andesíticas basálticas con intercalaciones de ceniza y ocasionalmente lapilli.

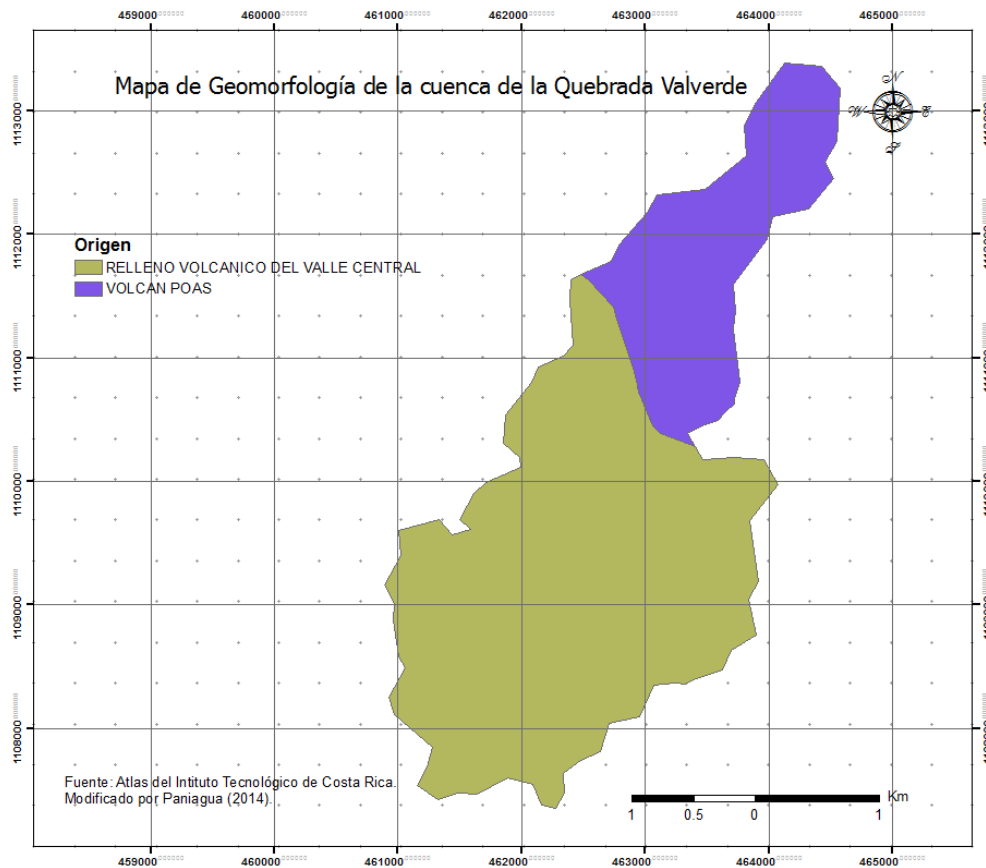
### ***3.3.3 Formación lahares y cenizas***

Las depresiones originadas por el levantamiento de los volcanes de la Cordillera Central durante el Pleistoceno-Holoceno, fueron rellenadas por avalanchas de lodo y cenizas que venían de los volcanes Irazú y Poás. Sobre dichos depósitos se encuentra una capa de ceniza cuyo espesor llega hasta los 15 metros y es el resultado de fenómenos semejantes a la erupción del Volcán Irazú en 1963.

## **3.4. Geomorfología**

El área de la cuenca de la Quebrada Valverde, según el mapa geomorfológico del Atlas Digital de Instituto Tecnológico de Costa Rica, se compone de formaciones de origen volcánico. Entre las que están coladas del Volcán Poás y relleno volcánico del valle central, como se observa en la Figura 17.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 17. Mapa geomorfológico de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

### **3.5. Suelo**

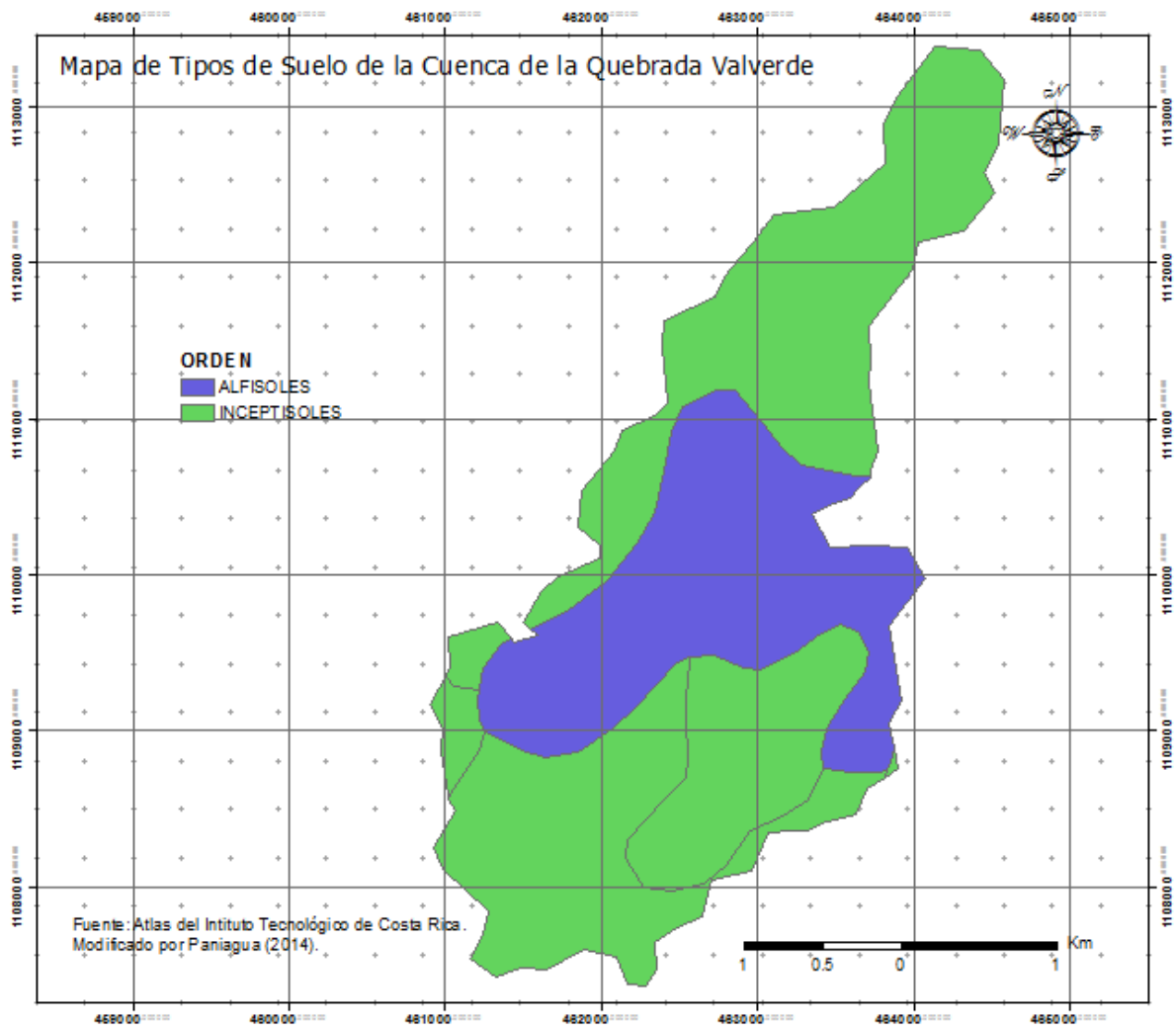
En este apartado, se hablará de las diferentes características del suelo de la Quebrada Valverde. Se describirá el uso, tipo y capacidad de uso del suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde y se comentará de los resultados. En la descripción del uso de suelo, se hará un cálculo detallado del porcentaje de área de la cuenca, que corresponde a cada uso de suelo diferente y se hará una corrección utilizando las fotografías satelitales de Google Earth, que son las más recientes.

#### **3.5.1. Tipo de Suelo**

La Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO) de las Naciones Unidas, en el año 1974, desarrolla una clasificación de suelos internacional llamada *Clasificación Mundial*

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

de Suelos. Esto con el objetivo de poder definir cualquier tipo de suelo que exista en el orbe terrestre. En Figura 18 se muestra un mapa de clasificación de tipo de suelo según la clasificación mundial de suelos.



**Figura 18. Mapa de Tipos de Uso de Suelo en la Cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

Los tipos de suelo encontrados en la cuenca de la Quebrada Valverde son los Alfisoles e Inceptisoles. Las características de estos suelos se comentan a continuación:

Alfisoles: Son suelos muy jóvenes. Debido a estas condiciones, poseen pocos minerales primarios estables. En el suelo encontrado en la cuenca tiene un horizonte argílico con más

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

de un 35% de saturación de bases. Similar al orden ultisol excepto por su falta fertilidad potencial.

Inceptisoles: Suelos muy poco meteorizados y desarrollados. En el suelo encontrado en la cuenca apenas se forma un horizonte cámbico B. Son suelos inmaduros que tiene débil expresión morfológica de suelo desarrollado.

### ***3.5.2. Capacidad de uso de suelo***

La capacidad de uso de suelo se define como el grado óptimo de aprovechamiento que posee un área de terreno determinada, con base en la clasificación de sus limitantes, para realizar las diferentes actividades agropecuarias en forma sostenida y por periodos prolongados. La metodología oficial de Costa Rica para la clasificación de capacidad de uso de suelo categoriza esta característica en ocho clases diferentes. La clasificación de estos suelos depende de diferentes factores, entre los que se encuentran:

- Pendiente
- Erosión sufrida
- Profundidad del suelo
- Textura del suelo
- Pedregosidad
- Fertilidad del suelo
- Toxicidad de cobre
- Salinidad de suelo
- Drenaje del suelo
- Riesgo de inundación
- Zona de vida
- Meses secos consecutivos
- Presencia de neblina
- Presencia de vientos

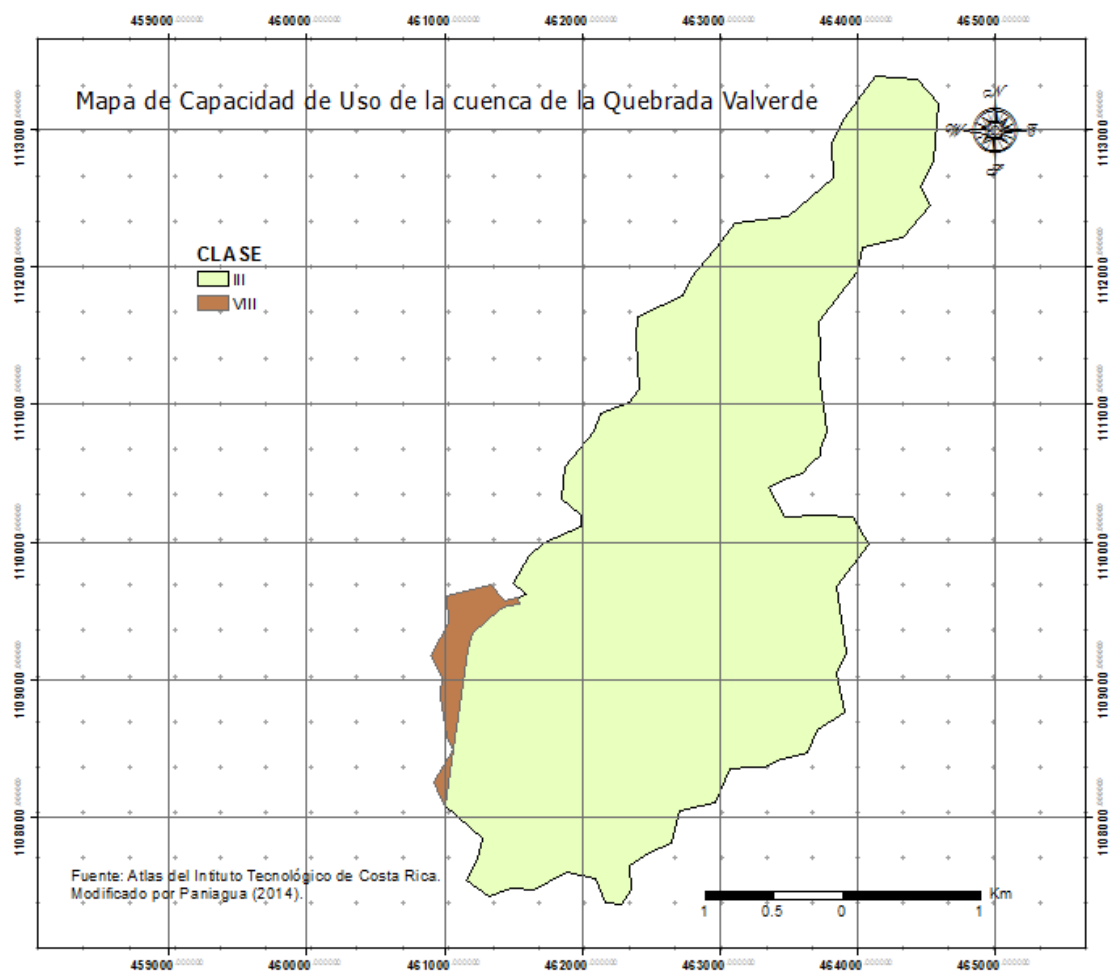
Utilizar un suelo en disconformidad con la capacidad de uso de un suelo, produce erosión de los suelos y degradación de los terrenos. En la Figura 19 se muestra el mapa de

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

capacidad de uso de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se observa como en la totalidad del área de la cuenca, se encuentran dos categorías de uso de suelo: III y VIII. Estas capacidades de uso de suelo se definen a continuación:

Categoría de capacidad de uso de suelo III: Presenta limitaciones moderadas que reducen las posibilidades de uso.

Categoría de capacidad de uso de suelo VIII: Estas tierras no reúnen las condiciones mínimas para ninguna actividad agrícola, pecuaria o forestal. Solo se pueden utilizar en protección total.



**Figura 19. Mapa de capacidad de uso de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

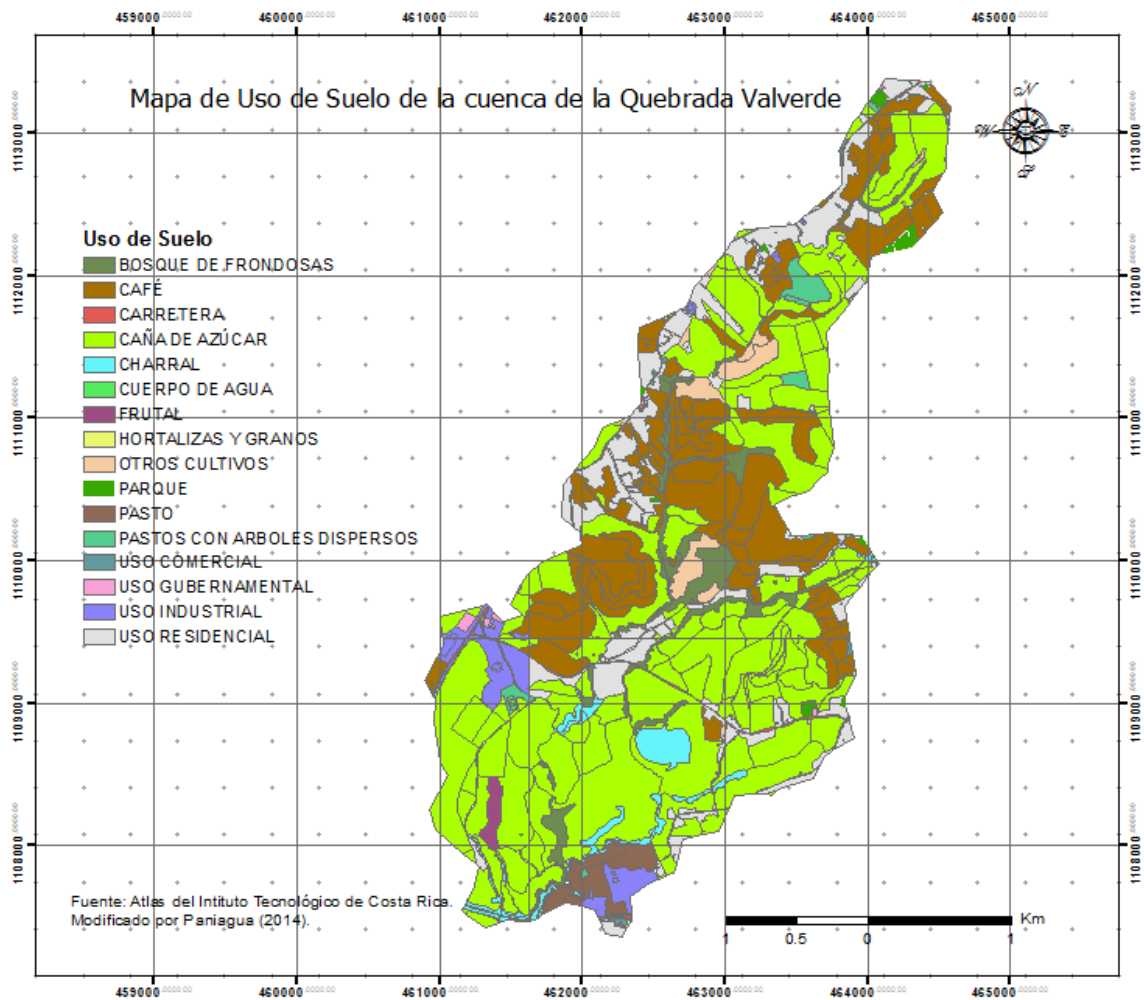
### **3.5.3. Uso de suelo**

En este apartado se describe el uso suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde. Para esto se consultaron varias fuentes: se revisa las fotografías satelitales más recientes de Google Earth y, por otro lado, se investiga los mapas de uso de suelo de PRUGAM. Con esta información se pretende conocer el comportamiento hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde, pues la escorrentía e infiltración dependen de varios factores, entre ellos, el uso de suelo de la cuenca en estudio.

En la Figura 20, se muestra el mapa de uso de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde, tomando como fuente los mapas de PRUGAM. Este mapa, como se observa, es bastante detallado y categoriza los usos que se le dan al suelo en 16 clases. Estas clases agrupan en 2 grandes categorías: cobertura urbana (alta impermeabilidad) y cobertura vegetal (baja impermeabilidad).

En la Figura 20 se observa que el uso de suelo que cubre la mayor cantidad de área de la cuenca de la Quebrada Valverde es el cultivo de caña de azúcar. Este resultado es de esperarse, pues la empresa Cooperativa Victoria, que produce azúcar, tiene sus plantas de producción en el cantón de Grecia y obtiene su materia prima de estas plantaciones. También se detalla cómo el cultivo de café, es el segundo uso de suelo que más cobertura tiene en la cuenca de la Quebrada Valverde.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 20. Mapa de Uso de Suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: PRUGAM, 2006. Modificado por Paniagua, 2016



**Cuadro 3. Áreas de usos de suelo en la cuenca de la Quebrada Valverde**

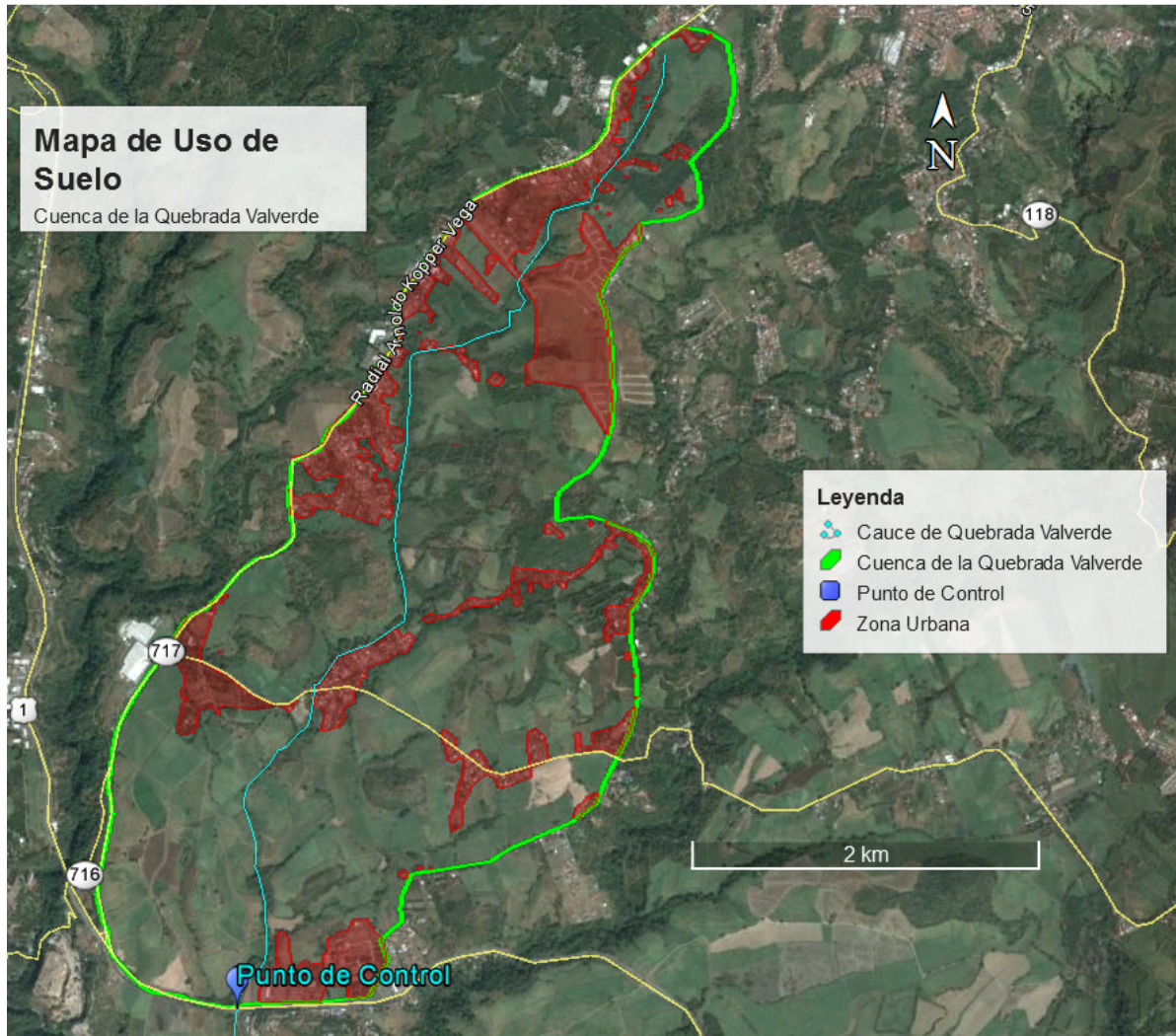
<b>Grupo</b>	<b>Categoría</b>	<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje del área total (%)</b>
<i>Cobertura Vegetal</i>	Bosque de frondosas	415287.8	4,2%
	Café	2150199.3	21,7%
	Caña de azúcar	5013417.8	50,7%
	Charral	259232.2	2,6%
	Cuerpo de agua	3296.7	0,0%
	Frutal	46799.1	0,5%
	Hortalizas y granos	1144.7	0,0%
	Otros cultivos	195904.7	2,0%
	Parque	47030.6	0,5%
	Pasto	170861.6	1,7%
	Pasto con árboles dispersos	113485.7	1,1%
<i>Cobertura Urbana</i>	Vías	62432.0	0,6%
	Uso comercial	16573.2	0,2%
	Uso gubernamental	35588.9	0,4%
	Uso industrial	279081.9	2,8%
	Uso residencial	1081219.1	10,9%

Fuente: PRUGAM, 2006. Modificado por Paniagua, 2016

Este mapa de uso de suelo de PRUGAM, fue confeccionado por la empresa española BLOM. Para su elaboración se utilizaron ortofotografías tomadas por la misión Carta, 2005 en asociación con la NASA para los vuelos y el CeNAT para el escaneo de las mismas. Once años han pasado desde la captura de las ortofotografías, por tanto, se utiliza las imágenes satelitales de Google Earth, para considerar los cambios de uso de suelo que se han presentado en los últimos once años.

La imagen satelital de la cuenca de la Quebrada Valverde se muestra en la Figura 21. En color rojo se cubre las áreas con un uso de suelo urbano. El resto de área corresponde a área con cobertura vegetal. La fecha de captura de la imagen satelital de Google Earth, que se utiliza para determinar el aumento del uso de suelo urbano, es del 22 de febrero de 2016.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 21. Imagen Satelital de Uso de Suelo de la Cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

Del mapa que se muestra en la Figura 21, se calcula el área de cobertura urbana y se obtiene que un 19,8% del área total de la cuenca de la Quebrada Valverde, tiene una cobertura urbana. Esto significa que del año 2005 (año en que se tomaron las ortofotografías para la elaboración del mapa de uso de suelo de PRUGAM) al año 2016, ha habido un aumento de 4,9% del área de la cobertura urbana. Con este dato calculado, se corrige los porcentajes de área del Cuadro 3 para considerar el aumento de cobertura urbana reciente.

**Cuadro 4. Áreas de usos de suelo corregidas en la cuenca de la Quebrada Valverde**

<b>Grupo</b>	<b>Categoría</b>	<b>Area (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Porcentaje del área total (%)</b>	<b>Porcentaje del área total (%)</b>
<i>Cobertura Vegetal</i>	Bosque de frondosas	391190,6	4,0	<i>80,2</i>
	Café	2025433,2	20,5	
	Caña de azúcar	4722512,5	47,7	
	Charral	244190,2	2,5	
	Cuerpo de agua	3105,4	0,0	
	Frutal	44083,5	0,4	
	Hortalizas y granos	1078,3	0,0	
	Otros cultivos	184537,3	1,9	
	Parque	44301,6	0,4	
	Pasto	160947,3	1,6	
	Pasto con árboles dispersos	106900,7	1,1	
<i>Cobertura Urbana</i>	Vías	83105,1	0,8	<i>19,8</i>
	Uso comercial	22061,0	0,2	
	Uso gubernamental	47373,4	0,5	
	Uso industrial	371493,8	3,8	
	Uso residencial	1439241,4	14,6	

Fuente: PRUGAM y Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

### 3.6. Caracterización del Clima

En este apartado se realizará la caracterización climática de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se utilizará la información de Atlas climatológico del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) y la de Atlas digital de Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR).

#### 3.6.1 Zonas de vida

El sistema de zonas de vida de Holdridge es un esquema que permite clasificar las áreas sobre la superficie de la tierra, dependiendo de su comportamiento general bioclimático. Este sistema permite conocer características generales de temperatura, precipitación y evapotranspiración, una vez clasificada la zona de estudio. El sistema de clasificación se basa primordialmente en los siguientes parámetros:

- Biotemperatura

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

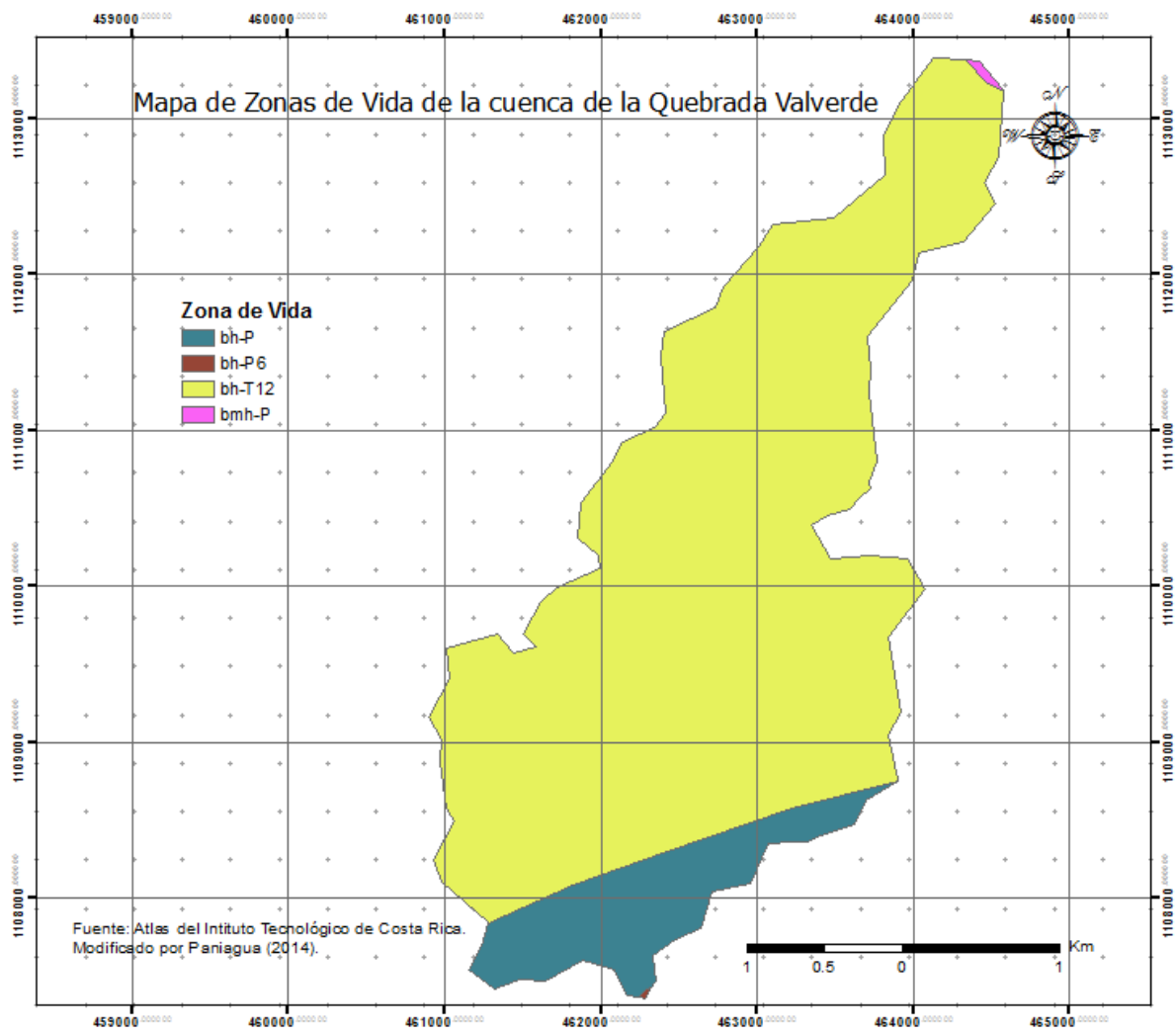
- Precipitación
- Evapotranspiración potencial
- Elevación sobre el nivel del mar de la zona en estudio
- Ubicación latitudinal

Con este sistema, Holdridge (1947), permite clasificar las diferentes zonas de la superficie de la tierra, en zonas biográficas dependiendo de los efectos que los parámetros anteriormente mencionados produzcan sobre la vegetación. De esta manera, identificando la vegetación presente en una zona de la superficie del globo terrestre, es posible definir valores de precipitación media anual, evapotranspiración potencial y temperatura de la zona.

El sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge (1947) es una herramienta que ayuda en gran medida a conocer las condiciones hidrológicas de la zona de estudio y conocer cómo se distribuye la precipitación, evapotranspiración y temperatura en el espacio, sin embargo, los rangos de estos parámetros que define Holdridge (1947) son muy amplios y por tanto, resultados generales.

En la Figura 22, se muestra que la cuenca de la Quebrada Valverde se encuentra casi en su totalidad, dentro de la zona de vida de Bosque Muy Húmedo Tropical Transición a Premontano. También posee una pequeña parte de su área en la zona de vida de Bosque Húmedo Premontano. Y por último, una extensión muy pequeña al norte de la cuenca de la Quebrada Valverde, Bosque Muy Húmedo Premontano. A continuación se definen las principales características de estas zonas de vida.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 22. Zonas de Vida de Clasificación de Holdridge, en la Cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

### ***Bosque Húmedo Tropical Transición a Premontano [bh-T12]***

Esta zona de vida presenta una precipitación media entre los 2000 mm y 4000 mm anuales de lámina de precipitación. La biotemperatura que se espera en estas zonas, se encuentra dentro del rango 24 °C-30 °C.

***Bosque Húmedo Premontano [bh-P]***

Esta zona de vida presenta una precipitación media entre los 2000 mm y 4000 mm anuales de lámina de precipitación. La biotemperatura que se espera en estas zonas, se encuentra dentro del rango 18 °C-24 °C.

***Bosque Muy Húmedo Premontano [bmh-P]***

Esta zona de vida presenta una precipitación media entre los 4000 mm y 8000 mm anuales de lámina de precipitación. La biotemperatura que se espera en estas zonas, se encuentra dentro del rango 18 °C-24 °C.

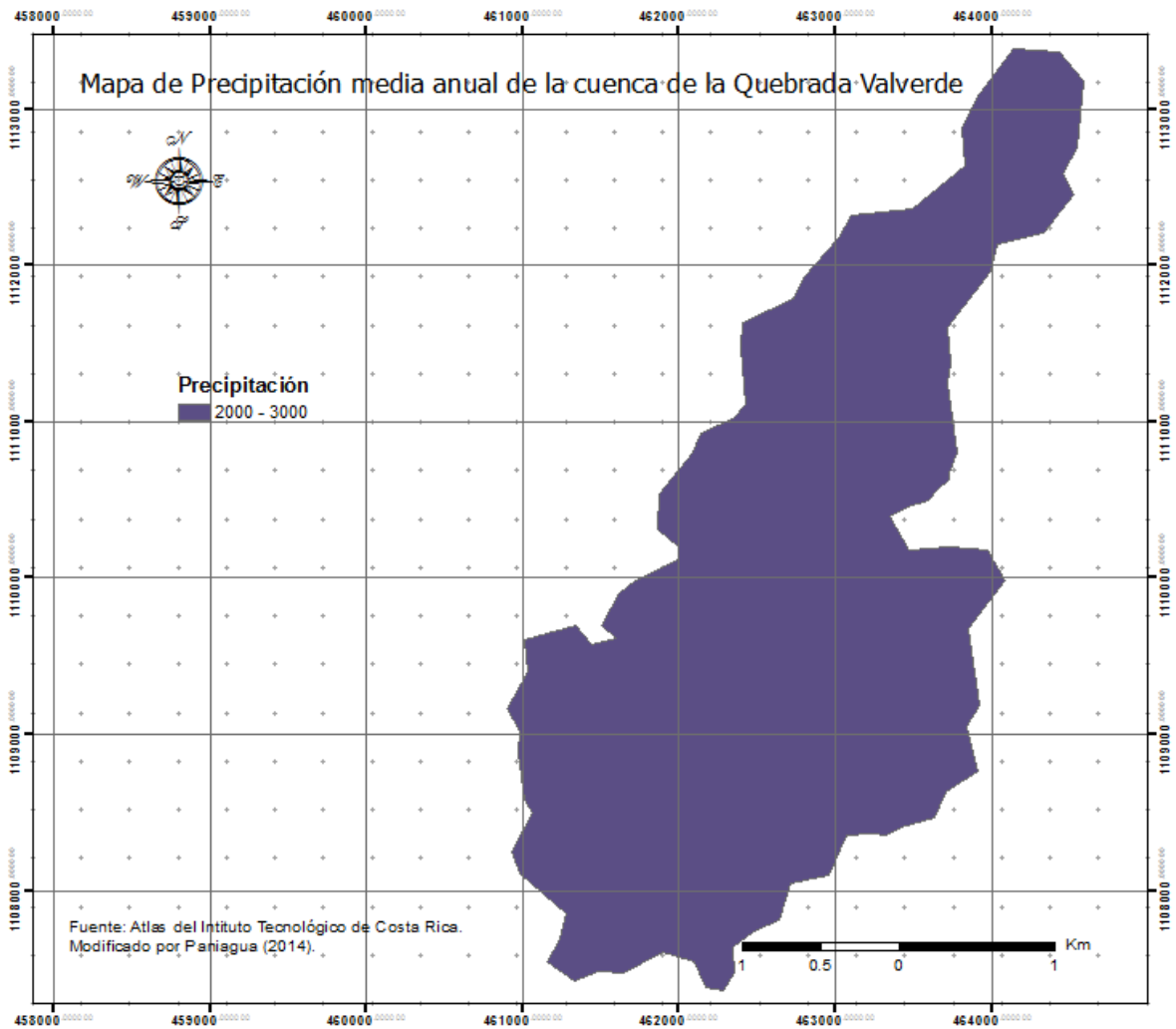
***Bosque húmedo premontano transición a basal [Bh-P6]***

Esta zona de vida presenta una precipitación media entre los 2000 mm y 4000 mm anuales de lámina de precipitación. La biotemperatura que se espera en estas zonas, se encuentra dentro del rango de 18 °C-24 °C.

***3.6.2. Precipitación***

El mapa de precipitación media anual de la cuenca de la Quebrada Valverde se muestra en la Figura 23, los valores de precipitación que se muestran corresponden al promedio de lluvia precipitada en periodos anuales. Se observa también, que toda la cuenca de la Quebrada Valverde tiene una precipitación media anual de 2000-3000 mm. Este dato, aunque es muy general, concuerda con los resultados obtenidos por medio de la clasificación de zonas de vida de Holdridge.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



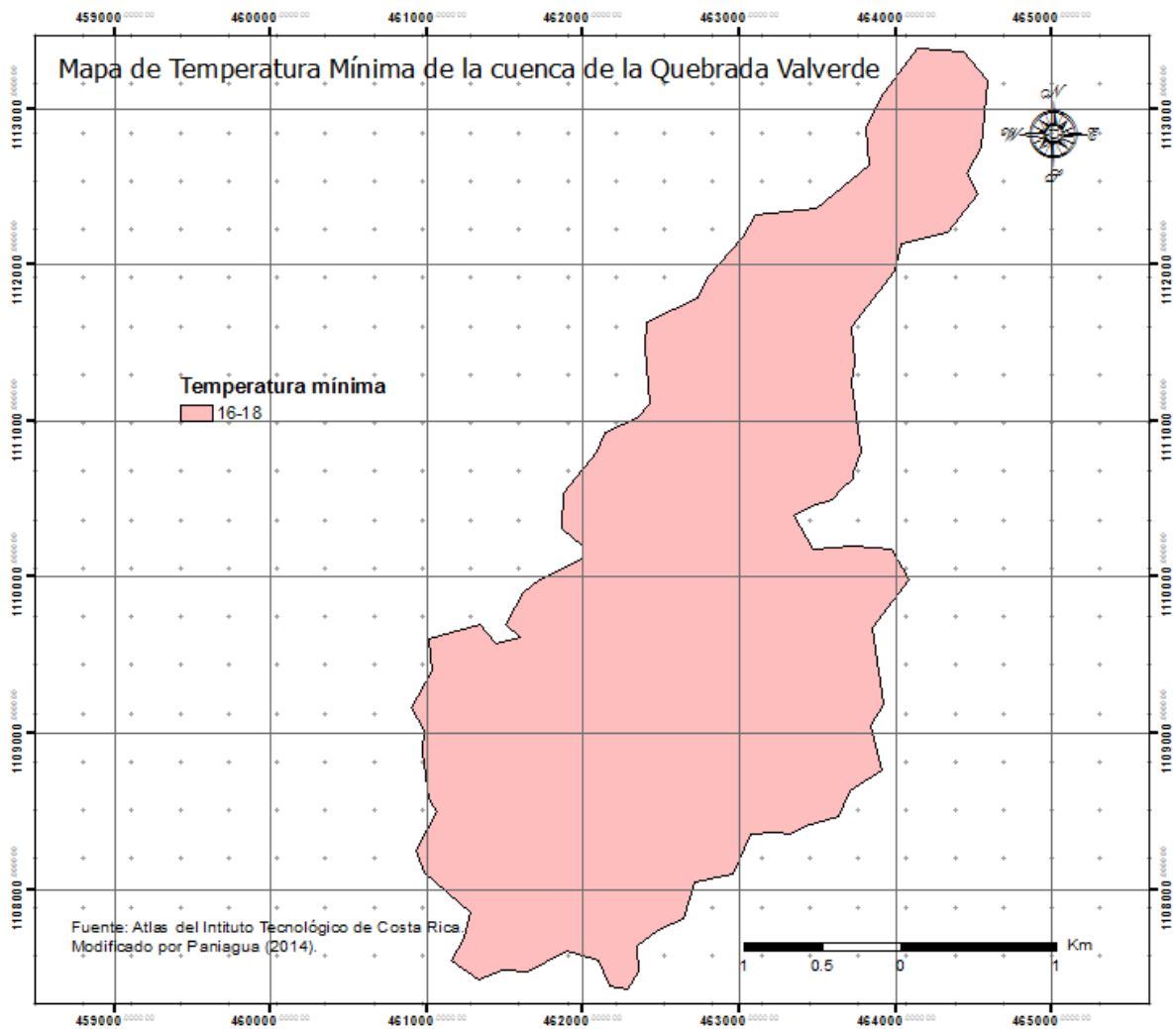
**Figura 23. Mapa de precipitación media anual de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

### **3.6.3 Temperatura**

El valor de temperatura que se muestra en la Figura 24, corresponde a los valores de precipitación temperatura mínima anual. En la cuenca de la Quebrada Valverde la temperatura mínima promedio es de 16 °C-18 °C.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



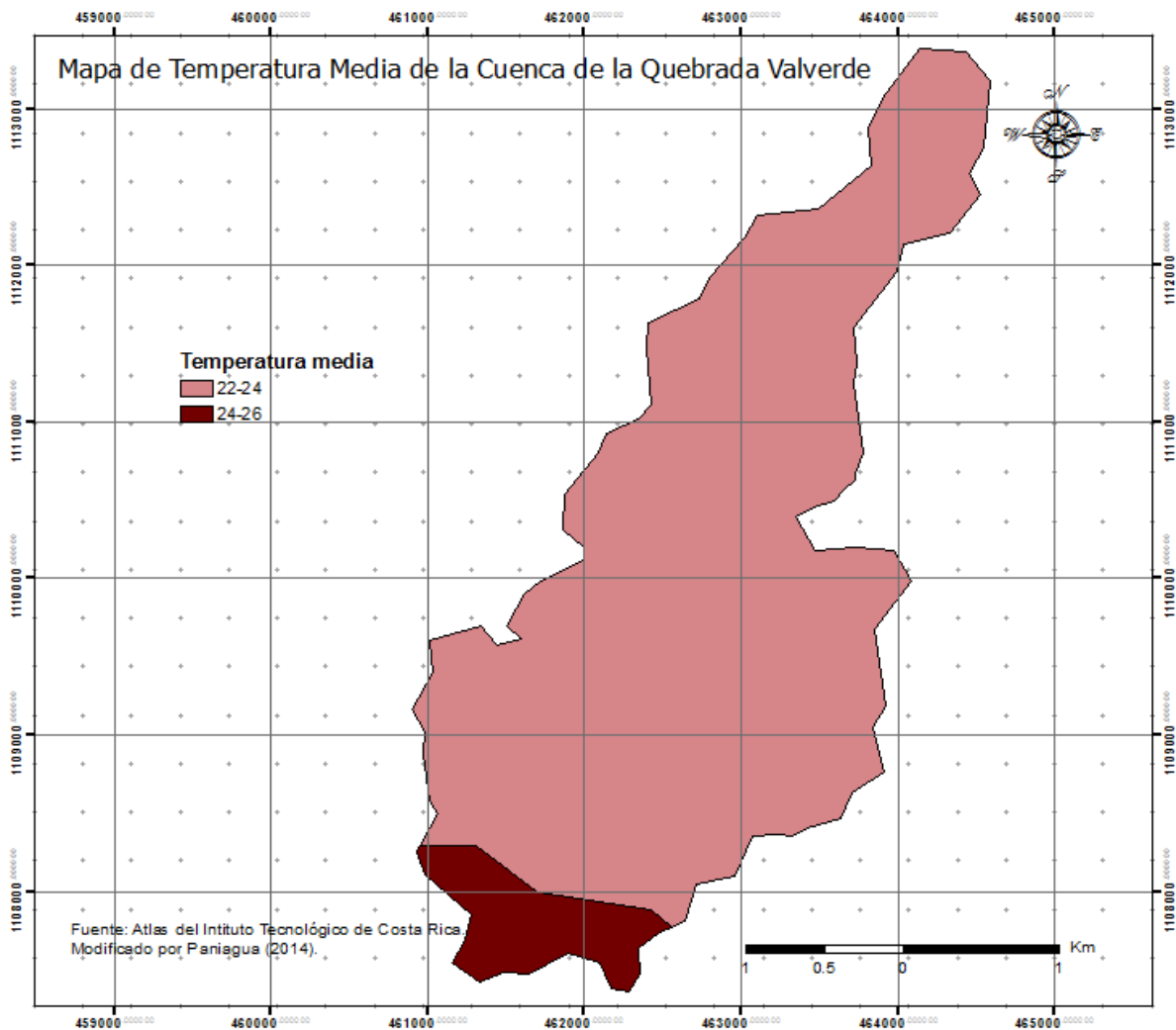
**Figura 24. Mapa de temperatura mínima de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

El valor de temperatura que se muestra en la Figura 25, corresponde a los valores de precipitación temperatura media anual. En la cuenca de la Quebrada Valverde la temperatura media promedio es de 22 °C-26 °C.



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

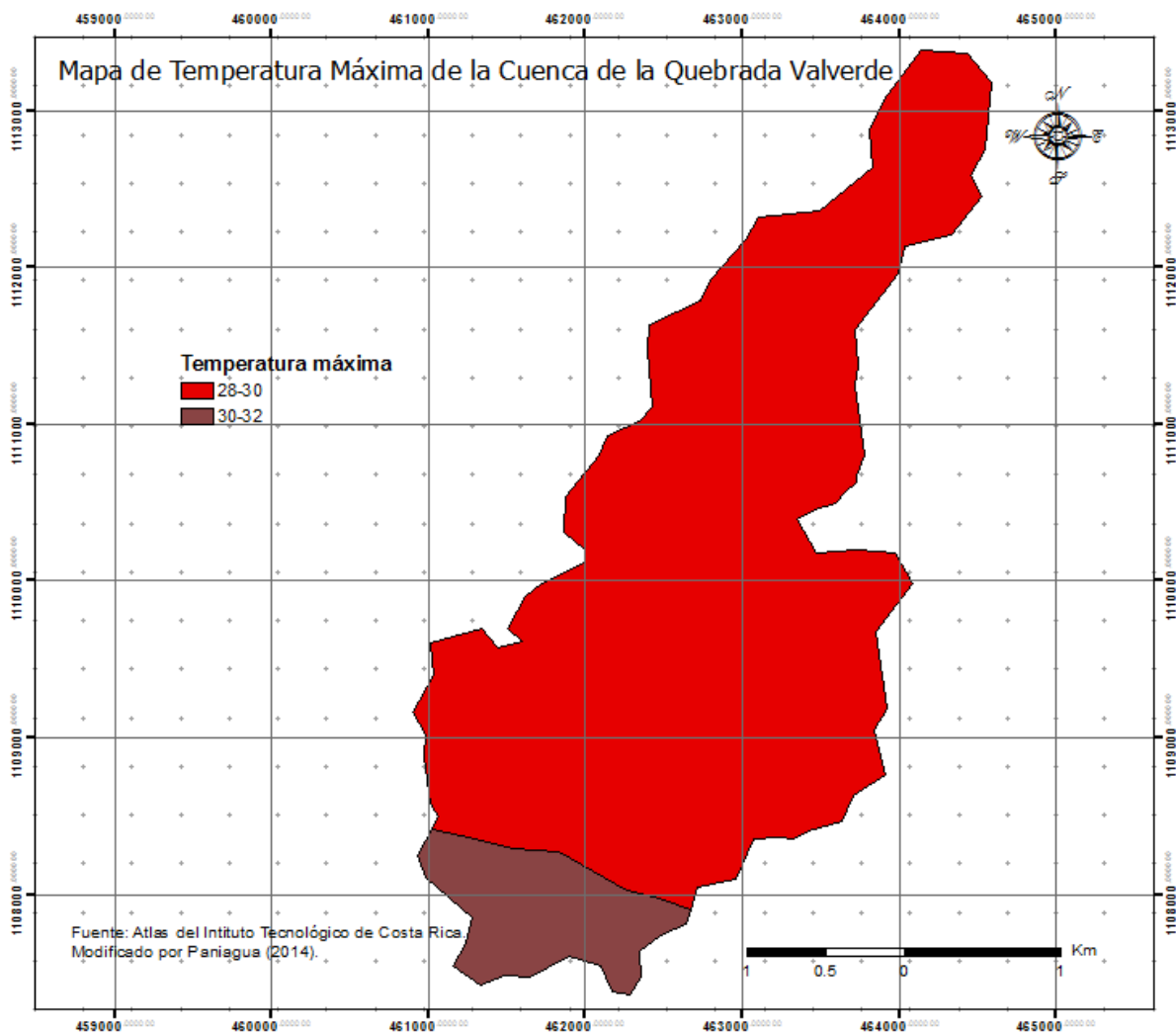


**Figura 25. Mapa de temperatura media de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

El valor de temperatura que se muestra en la Figura 26, corresponde a los valores de precipitación temperatura máxima anual. En la cuenca de la Quebrada Valverde la temperatura máxima promedio es de 28 °C-32 °C.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



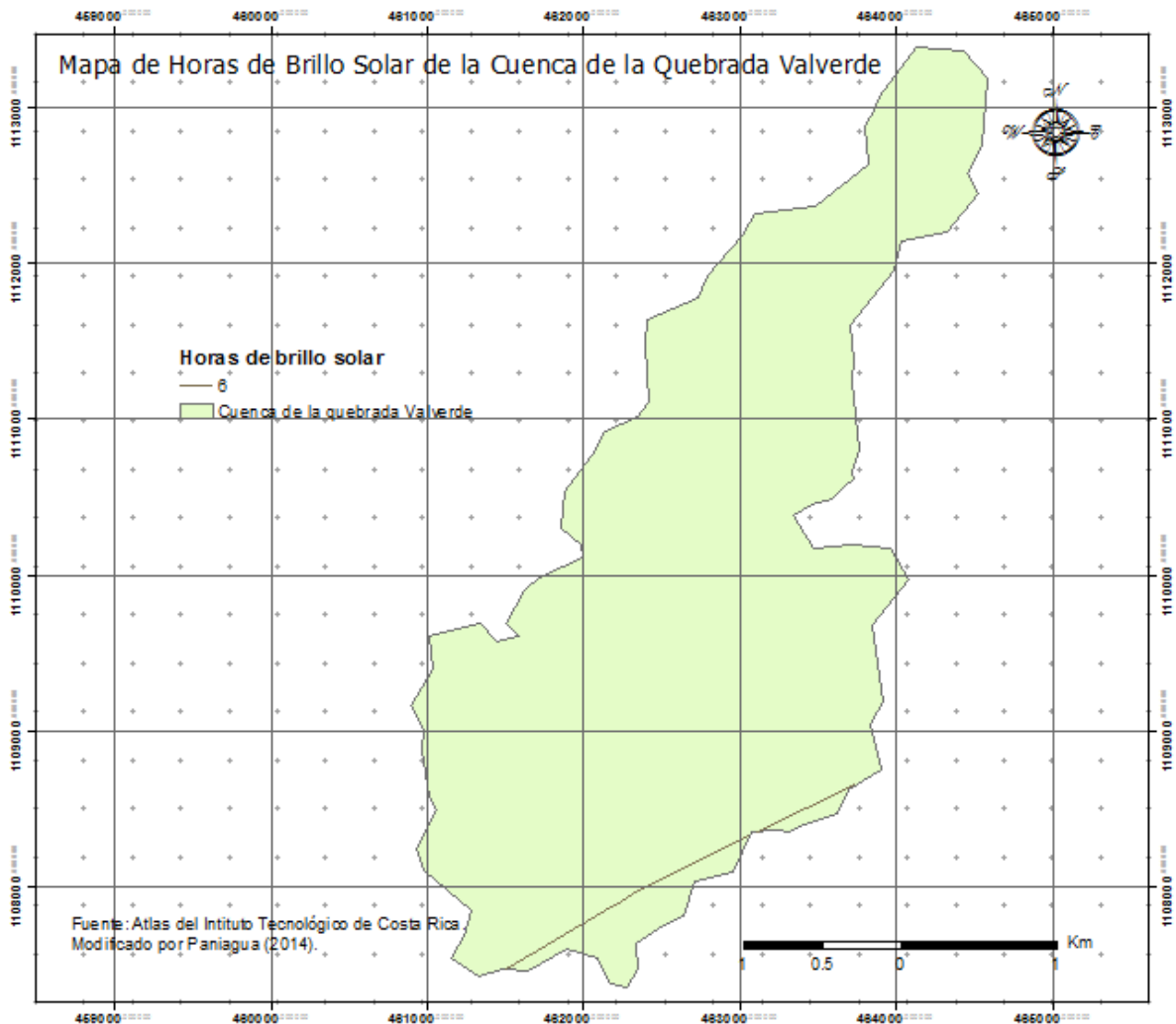
**Figura 26. Mapa de temperatura máxima de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

### **3.6.4 Brillo solar**

En la Figura 27 se muestra un mapa de isólinas de horas de brillo solar. Sobre la cuenca de la Quebrada Valverde pasa la isólinea de 6 horas de brillo solar.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 27. Mapa de horas de brillo solar de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

### ***3.6.5 Evapotranspiración***

El valor de evapotranspiración media anual es un dato que parece ser de importancia para este estudio. La evapotranspiración suele ser un factor que se considera a la hora de realizar el balance hídrico, pues es una salida de agua que tiene la cuenca. No obstante, por el tipo de estudio que se realiza –análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones – no es necesario considerar la evapotranspiración. Las inundaciones son fenómenos que ocurren en pocas horas, tiempo en el cual, la evapotranspiración no habrá modificado en forma significativa las condiciones hidrológicas de la cuenca. Por otro lado, no considerar la evapotranspiración es una suposición que tendrá como consecuencia, resultados

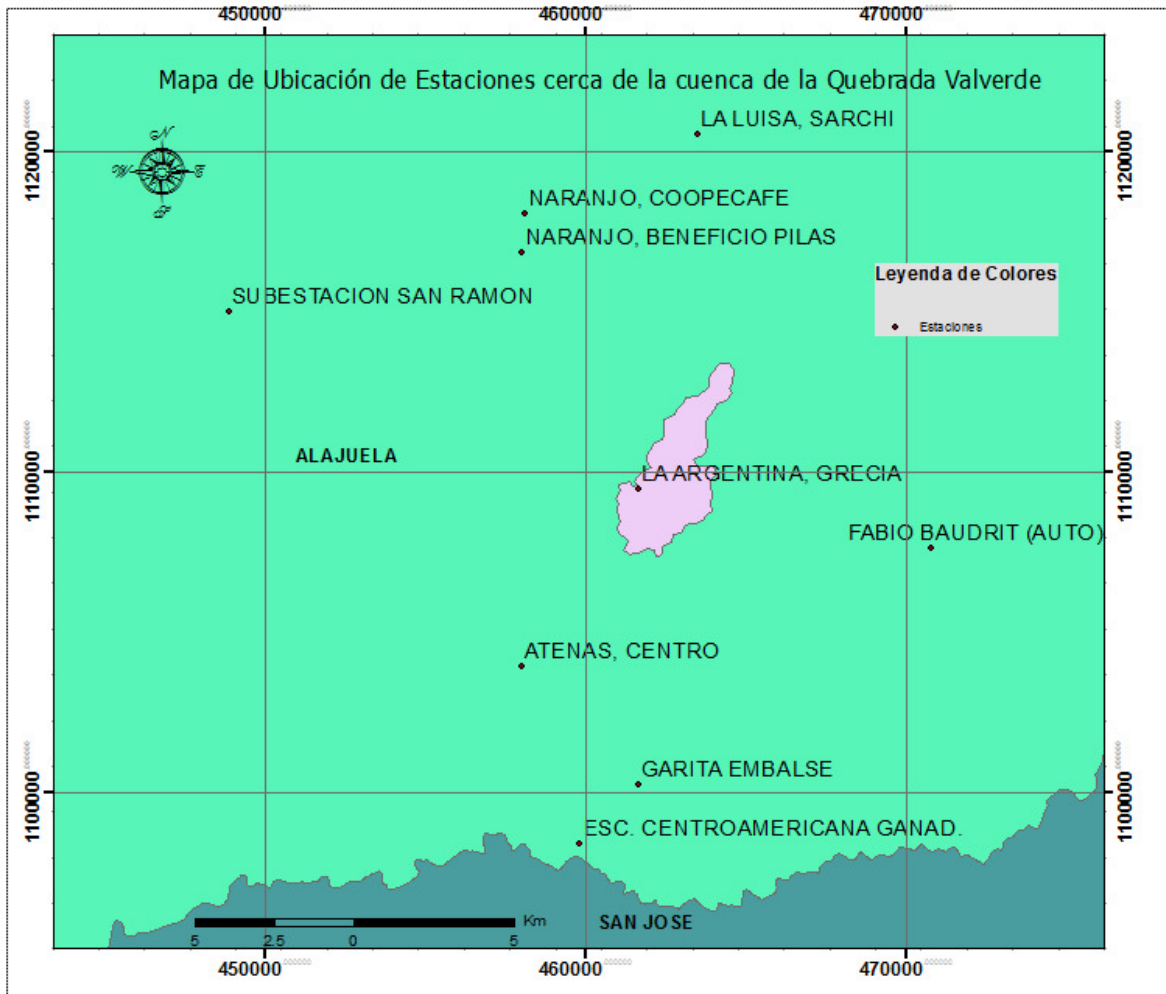
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

conservadores. Es por esta razón que no se tomara en cuenta la evapotranspiración en este estudio.

## **Capítulo 4. Precipitación**

La información de precipitación utilizada para el análisis de frecuencia se obtiene de la base de datos hidrometeorológicos del Instituto Meteorológico Nacional. Se solicitan datos de varias estaciones que se encuentran cerca de la cuenca de la Quebrada Valverde. Por otro lado, se confecciona un mapa de isoyetas para conocer que tanto influye los datos de cada estación en el comportamiento de la precipitación de la cuenca de la Quebrada Valverde. De este mapa de isoyetas se determina que el comportamiento de precipitación sobre la Quebrada Valverde es representado únicamente por los datos de lluvia máxima de una estación hidrometeorológica, la estación de la Argentina de Grecia (código 84003). Esta estación se ubica dentro del área de la cuenca de la Quebrada. Las otras estaciones más cercanas se encuentran lo suficientemente lejos para no influir en el comportamiento de la precipitación de la Quebrada Valverde, por tanto no son consideradas en el análisis de frecuencia. Esto se observa en el mapa de ubicación de las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la cuenca de la Quebrada Valverde que se muestra en la Figura 28.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 28. Mapa de ubicación de estaciones hidrometeorológicas cerca de la cuenca de la Quebrada Valverde.**

Fuente: Atlas ICTR, 2014. Modificado por Paniagua, 2016

La estación de la Argentina de Grecia, código 84003, se encuentra a una elevación de 760 m.s.n.m. Posee un registro de 78 datos consecutivos, desde 1937 hasta el 2014. Tiene un promedio de lluvia anual de 2447,7 mm de lámina de precipitación y se ubica en las coordenadas (461688; 1109375) CRTM05. Para el análisis de frecuencia se utilizará únicamente los datos de la estación de la Argentina de Grecia, código 84003, y se tomarán como datos fidedignos.

#### **4.1 Prueba de datos dudosos**

Cuando se realiza toma de datos de estaciones hidrometeorológicas, es común encontrar valores medidos que no parecen ser congruentes con los demás valores; ya sea por un error humano en la medición, el manejo de la información que la estación registre o una falla del equipo de medición. Independientemente del origen del error, estos datos afectan de manera significativa los parámetros estadísticos calculados a partir de la información a la que pertenecen. Los procedimientos para tratar los datos dudosos requieren un criterio que involucra consideraciones matemáticas e hidrológicas (Chow, 1994).

El *U.S. Water Resources Council*, propone un método que sirve como una herramienta para escoger qué datos utilizar en el análisis y qué datos se pueden omitir del análisis de frecuencia. Este método es presentado y explicado por Chow (1994) en el libro *Hidrología Aplicada* y consiste en una ecuación de frecuencia que establece los umbrales para los datos dudosos altos y bajos. Las ecuaciones para el cálculo de los umbrales es la siguiente:

$$y_H = \bar{y} + K_n S_y$$

$$y_L = \bar{y} - K_n S_y$$

Donde,

- $y_H$  es el umbral para datos altos
- $y_L$  es el umbral para datos bajos
- $\bar{y}$  es el promedio del logaritmo de los datos en estudio
- $S_y$  es la desviación estándar del logaritmo de los datos en estudio
- $K_n$  es el parámetro para el cálculo de datos dudosos (ver Cuadro 5)

Todos los valores que estén por encima de  $y_H$  y por debajo de  $y_L$  son considerados valores dudosos, y por lo tanto, no se deben tomar en cuenta para realizar el análisis de frecuencia. Los valores de  $K_n$  se muestran en el Cuadro 5. Es importante aclarar que los valores de  $K_n$  que se muestran en el Cuadro 5, son para detectar datos dudosos en el nivel de 10% de significancia en información normalmente distribuida.

**Cuadro 5. Valores de parámetro  $K_n$  para la prueba de datos dudosos**

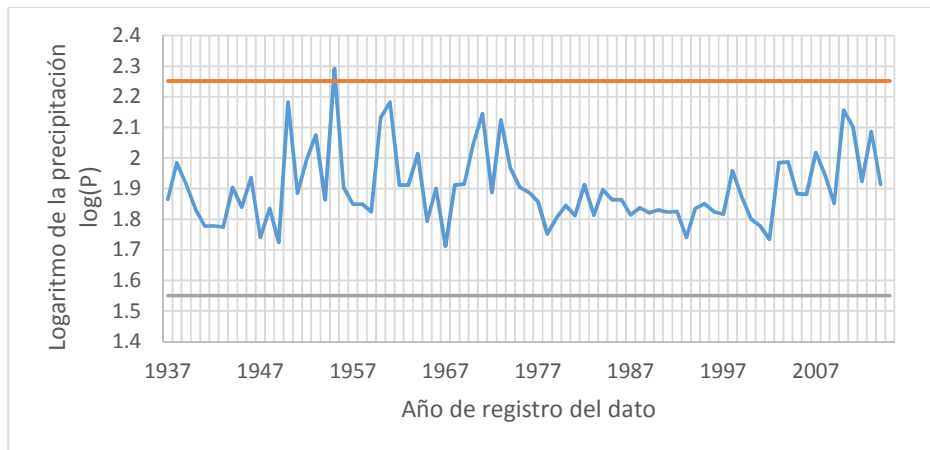
Tamaño de muestra	Valor de $K_n$	Tamaño de muestra	Valor de $K_n$	Tamaño de muestra	Valor de $K_n$	Tamaño de muestra	Valor de $K_n$
10	2,036	45	2,727	80	2,94	115	3,064
11	2,088	46	2,736	81	2,945	116	3,067
12	2,134	47	2,744	82	2,949	117	3,07
13	2,175	48	2,753	83	2,953	118	3,073
14	2,213	49	2,76	84	2,957	119	3,075
15	2,247	50	2,768	85	2,961	120	3,078
16	2,279	51	2,775	86	2,966	121	3,081
17	2,309	52	2,783	87	2,97	122	3,083
18	2,335	53	2,79	88	2,973	123	3,086
19	2,361	54	2,798	89	2,977	124	3,089
20	2,385	55	2,804	90	2,981	125	3,092
21	2,408	56	2,811	91	2,984	126	3,095
22	2,429	57	2,818	92	2,989	127	3,097
23	2,448	58	2,824	93	2,993	128	3,100
24	2,467	59	2,831	94	2,996	129	3,102
25	2,486	60	2,837	95	3,000	130	3,104
26	2,502	61	2,842	96	3,003	131	3,107
27	2,519	62	2,849	97	3,006	132	3,109
28	2,534	63	2,854	98	3,011	133	3,112
29	2,549	64	2,86	99	3,014	134	3,114
30	2,563	65	2,866	100	3,017	135	3,116
31	2,577	66	2,871	101	3,021	136	3,119
32	2,591	67	2,877	102	3,024	137	3,122
33	2,604	68	2,883	103	3,027	138	3,124
34	2,616	69	2,888	104	3,03	139	3,126
35	2,628	70	2,893	105	3,033	140	3,129
36	2,639	71	2,897	106	3,037	141	3,131
37	2,65	72	2,903	107	3,04	142	3,133
38	2,661	73	2,908	108	3,043	143	3,135
39	2,671	74	2,912	109	3,046	144	3,138
40	2,682	75	2,917	110	3,049	145	3,14
41	2,692	76	2,922	111	3,052	146	3,142
42	2,7	77	2,927	112	3,055	147	3,144
43	2,71	78	2,931	113	3,058	148	3,146
44	2,719	79	2,935	114	3,061	149	3,148

Fuente: U.S, Water Resources Council, 1981



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Cuando se tratan datos hidrometeorológicos, debido a su gran varianza, se utiliza una transformación logarítmica. Esto significa que a la hora de realizar la prueba de datos dudosos, se trabaja con el logaritmo de los valores en estudio.

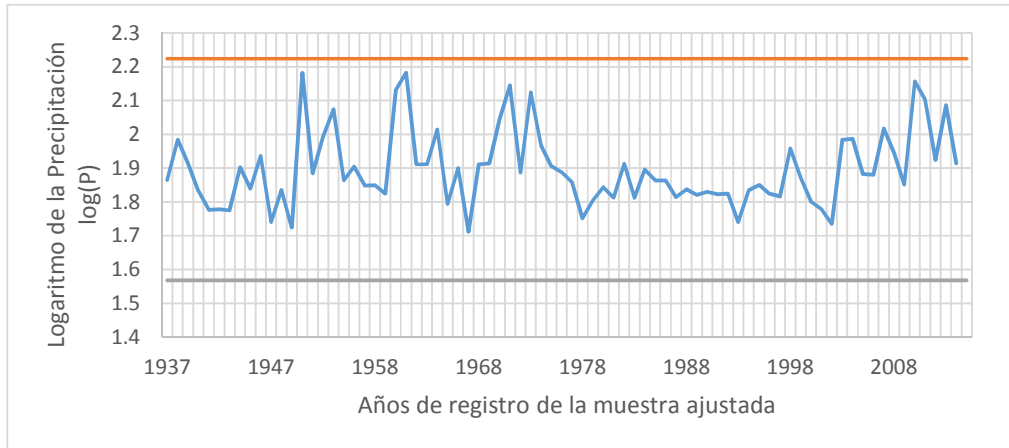


**Figura 29. Prueba de datos dudosos para la estación de la Argentina en Grecia**

En la Figura 29, se muestran los datos de precipitación máxima diaria de la estación de la Argentina en Grecia, para el periodo de 1937-2014. También se grafican los umbrales para datos altos y bajos. Como se observa en esta figura, todos los valores se encuentran dentro del umbral excepto el valor de precipitación máxima diaria para el año 1955, el cual corresponde a una lluvia de 195,8mm. Este dato se considera como un dato dudoso por lo que se omite del análisis de frecuencia.

Se vuelve a realizar la prueba de datos dudosos, esta vez, omitiendo el dato dudoso del año 1955. Se determina que la muestra de datos ajustada (sin el dato de lluvia del año 1955) se encuentra dentro de los umbrales límite.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 30. Prueba de datos dudosos para la estación de la Argentina en Grecia con datos ajustados**

Se utiliza el registro de datos ajustado como el insumo para realizar el análisis de frecuencia.

### **4.2 Análisis de Frecuencia**

Estimar la frecuencia con la que ocurre un evento específico se realiza mediante un análisis de frecuencia. De esta manera se obtiene cada cuánto tiempo, en promedio, ocurrirá un evento determinado. Determinar la frecuencia de eventos de precipitación extrema se realiza mediante un análisis de frecuencia. Para esto se utilizan distribuciones probabilísticas para valores extremos, como lo son precipitaciones máximas diarias anuales.

El análisis de frecuencia, se utiliza para obtener las precipitaciones máximas diarias anuales asociados a un periodo de retorno (frecuencia con que ocurre dicha evento de precipitación) de las estaciones en estudio.

La información meteorológica empleada en el análisis de frecuencia de lluvias máximas diarias anuales, fue facilitada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Se obtienen datos de series anuales de precipitación máxima diaria en estaciones cercanas a la cuenca de la Quebrada Valverde.

#### **4.2.1 Estimación de parámetros probabilísticos**

El análisis de frecuencia de precipitaciones máximas diarias anuales se realiza calculando distribuciones probabilísticas. Con las distribuciones probabilísticas es posible estimar los valores de lluvias máximas diarias anuales relacionadas a un periodo de retorno. Es decir, con las distribuciones probabilísticas, es posible conocer cada cuánto tiempo, en promedio, ocurre un evento de lluvia extrema.

Para el cálculo de las distribuciones probabilísticas, se utilizará el método estadístico de momentos lineales. Este método también es conocido como L-momentos. Corresponde a un sistema para el cálculo de los parámetros probabilísticos que definen las características de las distribuciones probabilísticas. Los parámetros se calculan a partir de la muestra de datos, se calcula las combinaciones lineales y se obtienen las medidas de ubicación, escala y forma. Los L-momentos son combinaciones lineales de los momentos ponderados de probabilidad. Para una distribución, los momentos se estiman con la siguiente integral definida:

$$\beta_r = \int_0^1 x(u)u^r du$$

En términos de los momentos que se calculan con la integral anterior, se obtiene los momentos lineales, que están dados por las siguientes ecuaciones:

$$\lambda_1 = \beta_0$$

$$\lambda_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$\lambda_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$\lambda_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 - 12\beta_1 + \beta_0$$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Para efectos de la estimación de parámetros, debido a la dificultad de estimar la probabilidad acumulada, se emplean los estimadores no sesgados de Landwehr (1979), que obtiene la siguiente aproximación para los primeros tres momentos:

$$\beta_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\beta_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(N-i)}{(N-1)} x_i$$

$$\beta_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-2} \frac{(N-i)(N-i-1)}{(N-1) * (N-2)} x_i$$

$$\beta_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-3} \frac{(N-i)(N-i-1)(N-i-2)}{(N-1)(N-2)(N-3)} x_i$$

Donde  $\beta_r$  es el momento ponderado de probabilidad de orden  $r$ ,  $N$  el tamaño de la muestra, y  $x_i$ , es el elemento  $i$ -ésimo de la serie de máximos ordenada en orden descendente, donde se cumple con:  $x_{i-1} > x_i > x_{i+1}$ .

Por tanto, los momentos lineales según Landwehr (1976), se estiman con las siguientes fórmulas:

$$l_1 = \beta_0$$

$$l_2 = 2\beta_1 - \beta_0$$

$$l_3 = 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0$$

$$l_4 = 20\beta_3 - 30\beta_2 - 12\beta_1 + \beta_0$$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Con los momentos lineales calculados con las ecuaciones anteriores se estima los parámetros estadísticos para el cálculo de las distribuciones de probabilidad de la muestra de datos de lluvia máxima.

### ***4.2.2. Distribuciones de probabilidad***

La distribución de probabilidad de una variable aleatoria, como lo es el valor de precipitación máxima en un año, es una función que le da un valor definido sobre la variable aleatoria de probabilidad de que el suceso ocurra. Con las distribuciones de probabilidad se logra extrapolar de frecuencias que van más allá del rango de los datos de la muestra. Esto es exactamente lo que se busca con el cálculo de las distribuciones de probabilidad, obtener la frecuencia de ocurrencia de eventos de lluvia extremos que se encuentran fuera de los valores que se han medido en la muestra de datos.

Para esto, se utilizan distribuciones de probabilidad recomendadas para estudiar muestras de datos extremos y ampliamente utilizados en variables hidrológicas como lo es la precipitación máxima diaria anual. Se utilizan las distribuciones de Gumbel, Valor Extremo Generalizado (VEG) y Pearson Tipo III.

Cada distribución de probabilidad se ajusta con los parámetros calculados anteriormente con el método de L-momentos. De esta manera, se ajustan las distribuciones de acuerdo a la muestra de datos observados. Una vez calculadas las distribuciones se debe elegir cuál de las tres se va a utilizar. Para llevar a cabo esta tarea se utiliza la prueba de bondad de ajuste de Chi cuadrado.

#### *4.2.2.1 Distribución Gumbel*

Esta distribución de probabilidad fue propuesta por Emil Julius Gumbel (1891-1966) y es ampliamente utilizada para datos de máximos. La distribución Gumbel es un caso particular de la distribución de probabilidad conocida como Fisher-Tippett. Esta distribución considera los siguientes parámetros:

Ubicación:  $\xi$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Escala:  $\alpha$

Precipitación máxima:  $x$

La distribución Gumbel se extiende en el siguiente rango:

$$-\infty < x < \alpha$$

La función de densidad de probabilidad de la distribución Gumbel está definida por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left[\frac{-(x - \xi)}{\alpha}\right] \exp\left[-\exp\left(\frac{-(x - \xi)}{\alpha}\right)\right]$$

La función de distribución de probabilidad acumulada Gumbel, está definida por la siguiente relación:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{-(x - \xi)}{\alpha}\right)\right]$$

Donde se puede despejar la variable  $x$  (precipitación máxima) en función de la probabilidad acumulada, obteniendo como resultado:

$$x(F) = \xi - \alpha * \ln[-\ln(F)]$$

La estimación de los parámetros que definen las ecuaciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada se obtienen mediante los momentos lineales. Para esto se utilizan las siguientes ecuaciones (Hosking, 1986):

$$\alpha = \frac{\lambda}{\ln(2)}$$

$$\xi = \lambda_1 - \gamma\alpha$$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Donde  $\gamma$  es la constante de Euler-Macheroni. El valor de la constante de Euler-Macheroni es de  $\gamma = 0,5772$

### *4.2.2.2. Distribución Valor Extremo Generalizado*

También se considera la distribución de probabilidad llamada Valor Extremo Generalizado. Esta distribución considera los siguientes parámetros:

Ubicación:  $\xi$

Escala:  $\alpha$

Forma:  $\kappa$

Precipitación máxima:  $x$

En la distribución VEG, existen varios casos. Estos casos dependen del valor del factor de forma, es decir, cuando el valor de factor de forma es igual a 0 la distribución es de Tipo 1 (Gumbel), cuando el factor de forma es negativo, es de tipo II (Fréchet) y cuando el factor de forma es positivo es de tipo III (Weibull).

$\kappa = 0$  Valor extremo tipo I (Gumbel)

$\kappa < 0$  Valor extremo tipo II (Fréchet)

$\kappa > 0$  Valor extremo tipo III (Weibull)

Los diferentes casos de la distribución de valor extremo se extienden en los siguientes rangos:

$$\kappa = 0 \quad \rightarrow \quad -\infty < x < \infty$$

$$\kappa < 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\xi + \alpha}{\kappa} \leq x < \infty$$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

$$\kappa > 0 \quad \rightarrow \quad -\infty < x \leq \frac{\xi + \alpha}{\kappa}$$

La función de densidad de probabilidad de los diferentes casos de la distribución de valor extremo está definida por la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp[-(1 - \kappa)y - \exp(-y)]$$

Donde el valor de  $y$  se calcula de diferentes maneras, dependiendo del valor del factor de forma. Estas son las ecuaciones:

$$\kappa = 0 \quad \rightarrow \quad y = \frac{x - \xi}{\alpha}$$

$$\kappa \neq 0 \quad \rightarrow \quad y = -\frac{1}{\kappa} \ln \left[ 1 - \frac{\kappa(x - \xi)}{\alpha} \right]$$

La función de densidad de probabilidad acumulada de los diferentes casos de la distribución de valor extremo están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$F(x) = \exp[-\exp(-y)]$$

Donde se puede despejar la variable aleatoria en función del valor de probabilidad acumulada. Este despeje depende del valor del factor de forma. Estas son las ecuaciones despejadas:

$$\kappa = 0 \quad \rightarrow \quad x(F) = \xi - \alpha \ln[-\ln(F)]$$

$$\kappa \neq 0 \quad \rightarrow \quad x(F) = \xi + \frac{\alpha [1 - (-\ln\{F\})^\kappa]}{\kappa}$$



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

La estimación de los parámetros que definen las ecuaciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada se obtienen mediante los momentos lineales. Para esto se utiliza las siguientes ecuaciones (Hosking, 1986):

$$\kappa = 7,8590c + 2,9554c^2$$

$$c = \frac{2}{3 + \tau_3} - \frac{\ln(2)}{\ln(3)}$$

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2}$$

$$\alpha = \frac{\lambda_2 \kappa}{(1 - 2^{-\kappa})\Gamma(1 + \kappa)}$$

$$\xi = \lambda_1 - \frac{\alpha[1 - \Gamma(1 + \kappa)]}{\kappa}$$

En las ecuaciones anteriores, es importante recalcar que  $\Gamma(x)$  se refiere a la distribución probabilística conocida como función gamma.

### 4.2.2.3 Distribución Pearson tipo III

También se considera la distribución de probabilidad llamada Pearson tipo III. Esta distribución considera los siguientes parámetros:

Ubicación:  $\mu$

Escala:  $\sigma$

Forma:  $\gamma$

Precipitación máxima:  $x$

Los diferentes casos de la distribución de Pearson tipo III se extienden en los siguientes rangos:

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

$$\gamma = 0 \quad \rightarrow \quad -\infty < x < \infty$$

$$\gamma < 0 \quad \rightarrow \quad -\infty < x \leq \xi$$

$$\gamma > 0 \quad \rightarrow \quad \xi < x \leq \infty$$

La función de densidad de probabilidad de los diferentes casos de la distribución de valor extremo, están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\gamma = 0 \quad \rightarrow \quad f(x) = \frac{(x - \xi)^{\alpha-1} \exp\left(\frac{-(x - \xi)}{\beta}\right)}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

$$\gamma < 0 \quad \rightarrow \quad f(x) = \phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\gamma > 0 \quad \rightarrow \quad f(x) = \frac{(\xi - x)^{\alpha-1} \exp\left(\frac{-(\xi - x)}{\beta}\right)}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)}$$

En las ecuaciones anteriores es importante recalcar que  $\phi(x)$  se refiere a la función de densidad de la distribución normal estándar. Esta función de densidad de la distribución normal estándar está definida por la siguiente ecuación:

$$\phi(x) = (2\pi)^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}x^2\right]$$

También, como se ha mencionado para las distribuciones de probabilidad anteriores,  $\Gamma(x)$  se refiere a la función de probabilidad gamma.

La función de densidad de probabilidad acumulada de los diferentes casos de la distribución de valor extremo están definidas por las siguientes ecuaciones:

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

$$\gamma = 0 \quad \rightarrow \quad F(x) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)$$

$$\gamma < 0 \quad \rightarrow \quad F(x) = 1 - \frac{G\left(\alpha; \frac{\xi - \mu}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$$

$$\gamma > 0 \quad \rightarrow \quad F(x) = \frac{G\left(\alpha; \frac{x - \xi}{\beta}\right)}{\Gamma(\alpha)}$$

En las ecuaciones anteriores es importante recalcar que  $\phi(x)$  se refiere a la función de densidad de la distribución normal estándar. Esta función de densidad de la distribución normal estándar está definida por la siguiente ecuación:

$$\phi(x) = (2\pi)^{-1/2} \exp\left[-\frac{1}{2}x^2\right]$$

Por otro lado, se debe aclarar que  $\Phi(x)$  es la distribución normal estándar, la cual está definida con la siguiente integral:

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \phi(t)$$

También, como se ha mencionado para las distribuciones de probabilidad anteriores,  $\Gamma(x)$  se refiere a la función de probabilidad gamma. Y la función  $G(\alpha, x)$  es la función gamma incompleta.

La estimación de los parámetros que definen las ecuaciones de densidad de probabilidad y probabilidad acumulada se obtienen mediante los momentos lineales. Para esto se utiliza las siguientes ecuaciones (Hosking, 1986):

$$\tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2}$$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Cuando se cumple que:

$$0 < \tau_3 < \frac{1}{3}$$

Entonces se utilizan las siguientes fórmulas:

$$z = 3\pi\tau_3^2$$

$$\alpha = \frac{1 + 0,2906z}{z + 0,1882z^2 + 0,0442z^3}$$

Y cuando se cumple que:

$$\frac{1}{3} < \tau_3 < 1$$

Se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$z = 1 - |\tau_3|$$

$$\alpha = \frac{0,36067z - 0,59567z^2 + 0,25361z^3}{1 - 2,78861z + 2,5609z^2 + 0,77045z^3}$$

$$\gamma = 2\alpha^{-\frac{1}{2}}\text{signo}(\tau_3)$$

$$\sigma = \frac{\lambda_2 \pi^{\frac{1}{2}} \alpha^{\frac{1}{2}} \Gamma(\alpha)}{\Gamma(\alpha + \frac{1}{2})}$$

$$\mu = \lambda_1$$

$$\beta = \frac{1}{2} \sigma |\gamma|$$

$$\xi = \mu - \frac{2\sigma}{\gamma}$$

También, como se ha mencionado para las distribuciones de probabilidad anteriores,  $\Gamma(x)$  se refiere a la función de probabilidad gamma.

### **4.2.3 Prueba de bondad de ajuste**

En el apartado anterior se calculó 3 distribuciones probabilísticas de extremos diferentes, con el fin de estimar la frecuencia de eventos extremos que no aparecen dentro del rango de la muestra de datos. No obstante, se debe realizar una prueba de bondad de ajuste, para conocer cuál es la distribución que más se ajusta a la muestra de datos de máximos. Existen varias pruebas como criterio para decidir la bondad de un ajuste. En este estudio se utiliza la prueba de bondad de ajuste de Chi Cuadrado.

#### **4.2.3.1 Chi Cuadrado**

La prueba de Chi Cuadrado es una prueba de hipótesis que compara la distribución de datos máximos observada con una distribución esperada de datos máximos. Esta prueba es una herramienta que define si la distribución escogida se ajusta o no. Y por otro lado, es un buen criterio para definir cuál de las distribuciones probabilísticas estudiadas es la que se ajusta más.

### **4.2.4 Intervalos de confianza**

Una variable que da una idea de la precisión de una estimación realizada a partir de un ajuste probabilístico es la varianza:  $Var(\hat{X}_p)$ . La varianza es igual al cuadrado del error estándar. Otra manera de describir la precisión de una estimación realizada a partir de un ajuste probabilístico son los intervalos de confianza. Generalmente, los intervalos de confianza se calculan a partir del error estándar del ajuste probabilístico.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

La manera tradicional de calcular el intervalo de confianza de una muestra de datos independientes y que se distribuye normalmente es con la siguiente fórmula:

$$\bar{x} - \frac{S_x}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \leq \mu_x \leq \bar{x} + \frac{S_x}{\sqrt{n}} t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}$$

Donde  $t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}$  es el valor de  $100 \left(\frac{\alpha}{2}\right) \%$  de la distribución de t' de Student con n-1 grados de libertad.

En muestras grandes ( $n > 40$ ), la distribución probabilística t' de Student se aproxima muy bien a la distribución normal, por lo que la fórmula para calcular el intervalo de confianza que se mostró anteriormente se puede expresar de la siguiente manera:

$$\hat{X}_p - Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{Var(\hat{X}_p)} \leq \mu_x \leq \bar{x} + Z_{1-\alpha/2} \sqrt{Var(\hat{X}_p)}$$

No obstante, estas fórmulas funcionan para muestras ajustadas mediante la distribución de probabilidad normal, la cual no fue tomada en cuenta en este estudio. Para las distribuciones consideradas en este estudio (Pearson III, VEG y Gumbel), existen modificaciones a estas fórmulas para adecuarlas a cada distribución de probabilidad. Estas modificaciones son las que se utilizan para el cálculo de los intervalos de confianza. Estas fórmulas se explican a continuación.

### **4.2.5 Precipitación máxima diaria estimada**

En este apartado se presentan los resultados de la estimación de lluvia máxima diaria anual sobre la cuenca de la Quebrada Valverde, obtenidos a partir del análisis de frecuencia. También se muestra los intervalos de confianza para los diferentes valores de frecuencia.

En el siguiente apartado, llamado "*Distribución Espacial de Precipitación*" se demuestra que la única estación hidrometeorológica que influye sobre el comportamiento de precipitación sobre la cuenca de la Quebrada Valverde, es la estación de la Argentina, Grecia (84003). Esto se debe a que la estación hidrometeorológica la Argentina, Grecia (84003) se ubica sobre la

### Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

cuenca de la Quebrada Valverde y además, las demás estaciones se encuentran lo suficientemente lejos de la cuenca de la Quebrada Valverde para no influir sobre ella.

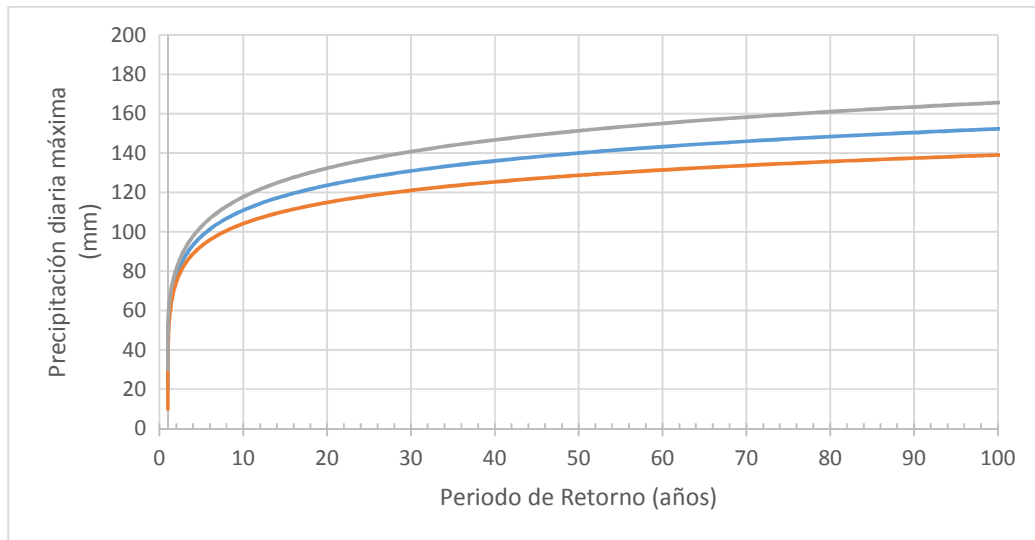
Es por esto, que solo se trabaja con los valores de precipitación máxima diaria anual estimados a partir de los datos de la estación hidrometeorológica la Argentina, Grecia (84003).

**Cuadro 6. Estimación de frecuencia de eventos máximos en La Argentina, Grecia**

Gumbel		Valor Extremo Generalizado		Pearson	
Tr	P	Tr	P	Tr	P
(años)	(mm)	(años)	(mm)	(años)	(mm)
2	77,80	2	75,03	2	74,3
5	97,76	5	94,15	5	96,58
10	110,97	10	109,75	10	113,18
15	118,43	15	119,77	15	122,85
20	123,64	20	127,37	20	129,69
25	127,66	25	133,58	25	139,99
50	140,04	50	154,81	50	151,42
100	152,33	100	179,45	100	167,81
-					
$\chi^2$	14,38	1,21		2,21	

En el Cuadro 6, también se muestra el estadístico de la prueba de  $\chi^2$ . Como se observa, el menor valor es el de la distribución Valor Extremo Generalizado. Es por esta razón, que se utilizan los resultados de la distribución de VEG, pues es la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a la muestra de datos.

En la Figura 31 se muestran los intervalos de confianza calculados para la distribución de probabilidad de máximos VEG. El cálculo de los intervalos de confianza se realizó utilizando las fórmulas que se presentan en el libro "Handbook of Hydrology" de David, R. Maidment (1993).



**Figura 31. Intervalos de confianza con distribución VEG para la estación La Argentina, Grecia**

#### **4.3 Distribución espacial de precipitación**

Los eventos de precipitación tienen gran variabilidad en el tiempo y en el espacio porque son eventos de naturaleza aleatoria. La atmósfera es un sistema caótico, es por esto que es necesario conocer la distribución de la precipitación en el espacio.

Para calcular la distribución espacial de la precipitación existen varios métodos que permiten modelar cómo se distribuye la precipitación en el espacio, como lo es el método de las isoyetas o el de polígonos de Thiessen. Para este estudio, se utiliza el método de las isoyetas. Este método consiste en interpolar la variable para cada punto en el espacio, a partir de varios puntos conocidos de la variable, que en este caso es la precipitación máxima diaria anual. La interpolación se puede realizar con varias herramientas matemáticas.

Para aplicar este método, se utiliza como puntos conocidos de la variable la precipitación máxima diaria calculada para las estaciones más cercanas de la cuenca de la Quebrada Valverde y mediante el sistema de información geográfica obtenida de ArcGIS, se realiza la interpolación.



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Los mapas de isoyetas muestran que la única estación hidrometeorológica que influye sobre el comportamiento de precipitación sobre la cuenca de la Quebrada Valverde es la estación de La Argentina, como se mencionó en el inicio de este capítulo. Es por esto que los valores de precipitación máxima diaria que se utilizan para el desarrollo de este estudio son los obtenidos a partir de los datos de la estación de La Argentina, Grecia.

Es importante recalcar que en la elaboración de estos mapas no se consideró el efecto de las pendientes del terreno, ni los gradientes de la temperatura. Tampoco se consideró el efecto de la velocidad y dirección de los vientos predominantes de la región. Por otro lado, no se toma en cuenta la geomorfología de la cuenca de la Quebrada Valverde. Todos estos factores adicionales que pueden cambiar el comportamiento de la precipitación se consideran en el análisis de la cuenca de la Quebrada Valverde para obtener la distribución temporal de la precipitación.

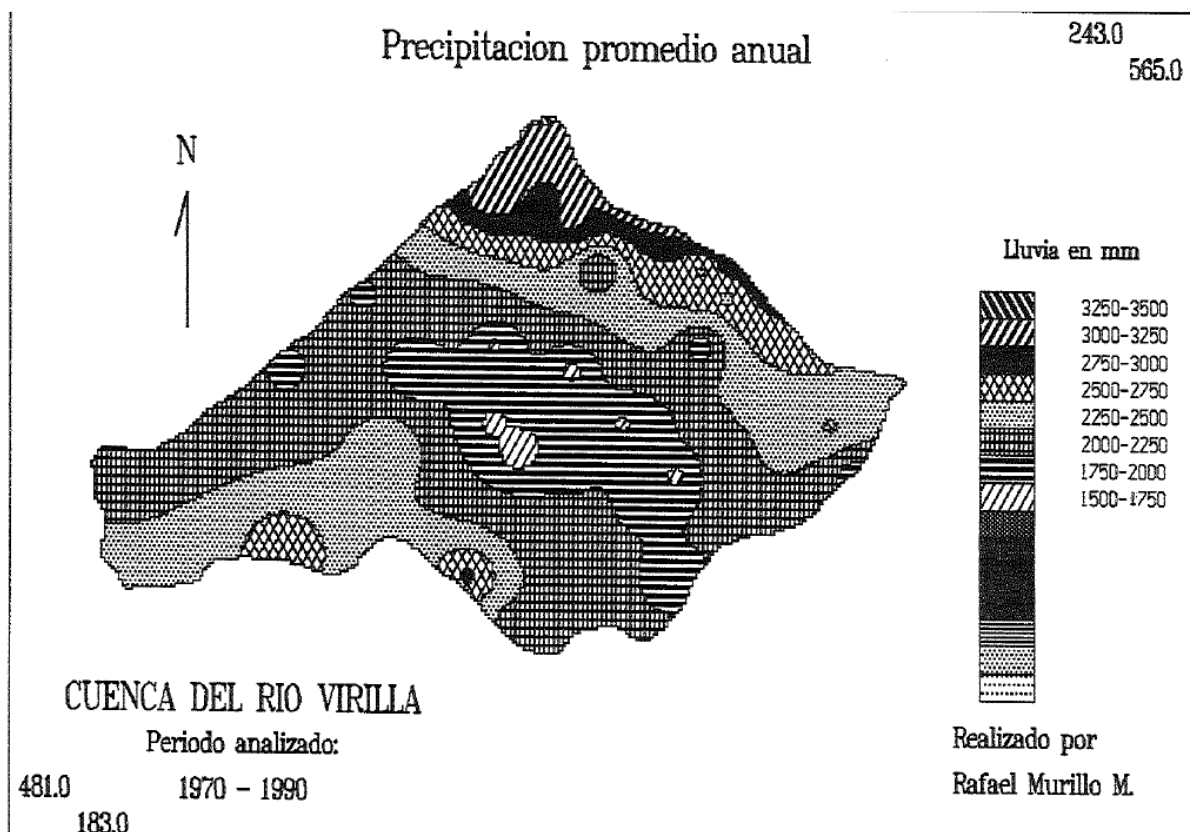
### **4.4 Distribución temporal de la precipitación**

Además de la distribución espacial de la precipitación, es importante conocer la distribución temporal del evento de precipitación, es decir, cómo varía la intensidad de lluvia durante el tiempo que en que se presenta el evento de precipitación. Por el hecho de que no existen registros de caudales disponibles para la Quebrada Valverde, no se estudia ningún evento extremo de precipitación, pues es necesario un hidrograma registrado para la calibración con el modelo hidrológico. Es por esto, que se decide utilizar hietogramas característicos que representen el comportamiento de la precipitación en el tiempo de los eventos de precipitación máxima en la zona.

En el trabajo final de graduación de Murillo (1994) se realiza un estudio de intensidades de lluvia sobre la cuenca del Río Virilla. En este trabajo se analizan los eventos de precipitación que ocurren sobre esta cuenca y cómo se comporta en el tiempo y en el espacio, tomando cuenta factores como lo es la geomorfología y variables hidrometeorológicas como lo son el viento, la temperatura, entre otras variables hidrológicas de importancia. De este trabajo se obtienen los hietogramas característicos de estaciones hidrometeorológicas cercanas a la cuenca de la Quebrada Valverde.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

El hietograma característico que se presenta en la Figura 33 corresponde al hietograma característico de la estación Coopecafe Naranjo (con código 84075), desarrollado por Murillo (1994). Se utiliza este hietograma característico como representativo para toda la cuenca de la Quebrada Valverde. La estación Coopecafe Naranjo se encuentra al Noroeste de la cuenca de la Quebrada Valverde, a unos 8 km aproximadamente del centroide de la cuenca.



**Figura 32. Mapa de distribución espacial de precipitación promedio anual**

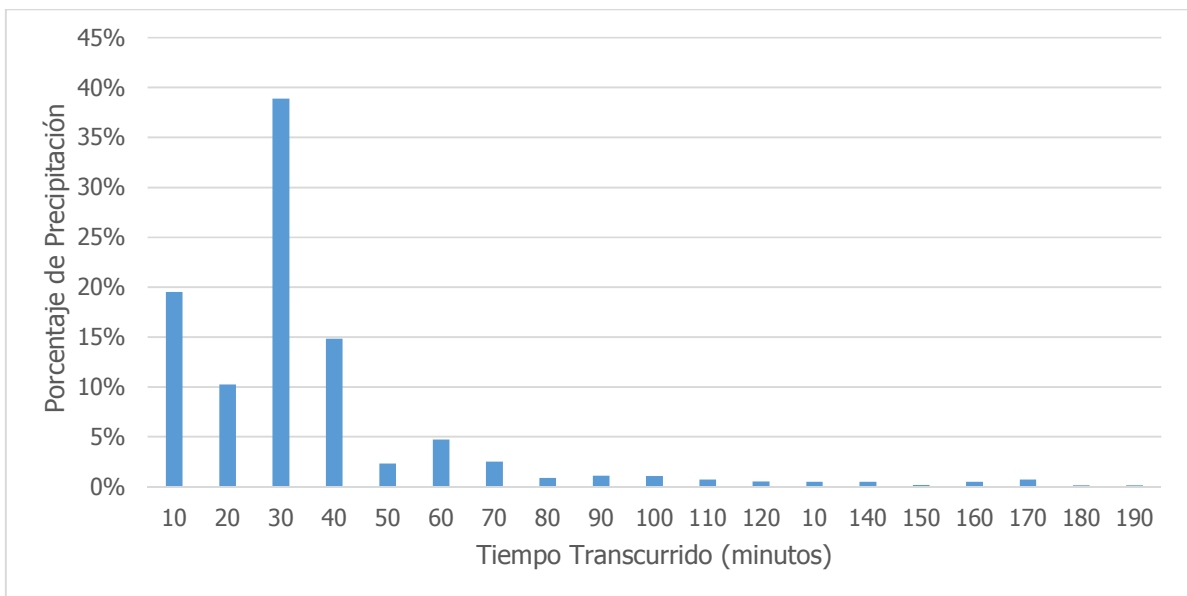
Fuente: Murillo, 1994

En la Figura 32 se muestra el mapa que obtuvo Murillo (1994) de distribución espacial de la precipitación en la cuenca del Río Virilla. Aunque la cuenca de la Quebrada Valverde no se encuentre dentro de la del río Virilla, se encuentra muy cerca. Del mapa de la Figura 32 se observa la influencia que tiene la estación Coopecafe Naranjo (que de igual manera no se encuentra dentro de la cuenca del Río Virilla) sobre el mapa generado. Se identifica que la zona que se encuentra al Noroeste de la cuenca del Río Virilla es significativamente influenciada por

### Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

la estación Coopecafe Naranjo y que tiene un promedio de precipitación anual que va entre los 2000 mm-2250 mm. Este resultado concuerda con lo que se detalla en el capítulo de caracterización de la cuenca de la Quebrada Valverde.

Es por esta razón, que se utiliza el hietograma característico de la estación Coopecafe Naranjo como el representativo de la cuenca de la Quebrada Valverde y se realizará el análisis hidrológico con este hietograma.



**Figura 33. Hietograma característico de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Murillo, 1994

Otro hietograma que puede ser representativo de la distribución temporal de la lluvia en la cuenca de la Quebrada Valverde es el hietograma de la estación Embalse La Garita, del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Este hietograma también se incluye en los resultados del trabajo final de graduación de Murillo (1994).

No obstante, el hietograma de la estación Embalse la Garita del ICE, posee variaciones de intensidad de lluvia particulares, que no se asemejan al comportamiento de lluvia de la zona de Grecia, y más específicamente, de la cuenca de la Quebrada Valverde.

**Cuadro 7. Hietograma característico de la cuenca de la Quebrada Valverde**

<b><i>Estación: Cooperativa Café, Naranjo</i></b>	
Tiempo transcurrido (minutos)	Porcentaje de precipitación Total
10	19,51%
20	10,25%
30	38,88%
40	14,83%
50	2,32%
60	4,73%
70	2,49%
80	0,88%
90	1,11%
100	1,07%
110	0,73%
120	0,54%
130	0,51%
140	0,49%
150	0,16%
160	0,51%
170	0,72%
180	0,12%
190	0,12%
Total	100,00%

Fuente: Murillo, 1994

## **Capítulo 5. Modelo hidrológico**

En este capítulo se entra en detalle con el modelo hidrológico, la metodología aplicada, su análisis y resultados. Para realizar el modelo hidrológico se utiliza el programa computacional HEC-HMS, con el cual se modela el sistema de precipitación/escorrentía de una cuenca. El modelo hidrológico necesita de los resultados obtenidos del análisis de frecuencia y de la caracterización de la cuenca. Los resultados que se esperan obtener de este capítulo son hidrogramas sintéticos para diferentes eventos extremos de precipitación asociados a un periodo de retorno que nos permitan realizar el modelo hidráulico.

### **5.1. Método de Pérdidas del NRCS**

Para modelar el proceso de precipitación – escorrentía es necesario conocer la parte de la precipitación que se infiltra en los suelos. Para calcular las pérdidas por infiltración existen varios métodos aplicables a la cuenca de la Quebrada Valverde. Se utilizará el método desarrollado por el Natural Resources Conservation Service (NRCS) llamado número de curva de escorrentía CN. Este método permite calcular las pérdidas iniciales en la cuenca cuando ocurre un evento de precipitación.

Cuando llueve sobre la cuenca, siempre la cantidad de agua que se escurre y va a los ríos es menor a la cantidad de agua que llueve. Esto por la razón de que gran cantidad de agua se queda atrapada en la cobertura vegetal y otra parte se infiltra en los suelos. El agua que queda atrapada en la cobertura vegetal es utilizada por las plantas o evaporizada para seguir con el ciclo de la lluvia. Es por esto, que siempre la escorrentía es menor que la precipitación. Estos son los principios en que se basa el método del NRCS. A continuación se explicará un poco sobre el método:

La fórmula principal del método del NRCS es:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Donde:

$F_a$  = Profundidad adicional de agua retenida

$P_e$  = Precipitación de exceso de precipitación o escorrentía directa

$S$  = retención potencial máxima

$P$  = Profundidad de precipitación

$I_a$  = Abstracción inicial

En otras palabras, la hipótesis de este método es que las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales son iguales, según explica Serrano (2013). Por otro lado, por el principio de continuidad se tiene que:

$$P = P_e + I_a + F_a$$

Resolviendo las dos ecuaciones anteriores, para la precipitación de exceso se obtiene la siguiente expresión matemática:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Las abstracciones iniciales se han calculado como el 20% de la retención potencial máxima. Esta suposición se ha utilizado empíricamente y ha dado buenos resultados. Es por esta razón que se utiliza la siguiente fórmula:

$$I_a = 0,2 * S$$

Otro aspecto que considera el método del NRCS es el grado de impermeabilidad del suelo. Esto lo hace asignándole al suelo un número de curva CN. Los números de curva son valores adimensionales que se encuentran dentro del rango 0-100. El valor de número de curva de 0 corresponde a la condición más permeable, mientras que un valor de 100 corresponde a una condición totalmente impermeable. El número de curva de un suelo está relacionado con su capacidad de retener agua, es decir, el valor de CN se puede expresar matemáticamente en función de S. La relación matemática entre N y S es la siguiente:

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

$$CN = \frac{2540}{S(cm) + 24,5}$$

Los números de curva se obtienen de tablas establecidas por el NRCS. En estas tablas se definen 4 grupos de tipo de suelo (A, B, C, D), con características definidas. Las tablas que presenta el NRCS aplican para condiciones antecedentes de humedad normales (AMC II). En caso de que se tengan condiciones secas (AMC I) o condiciones húmedas (AMC III), los números de curva equivalentes se calculan de la siguiente manera:

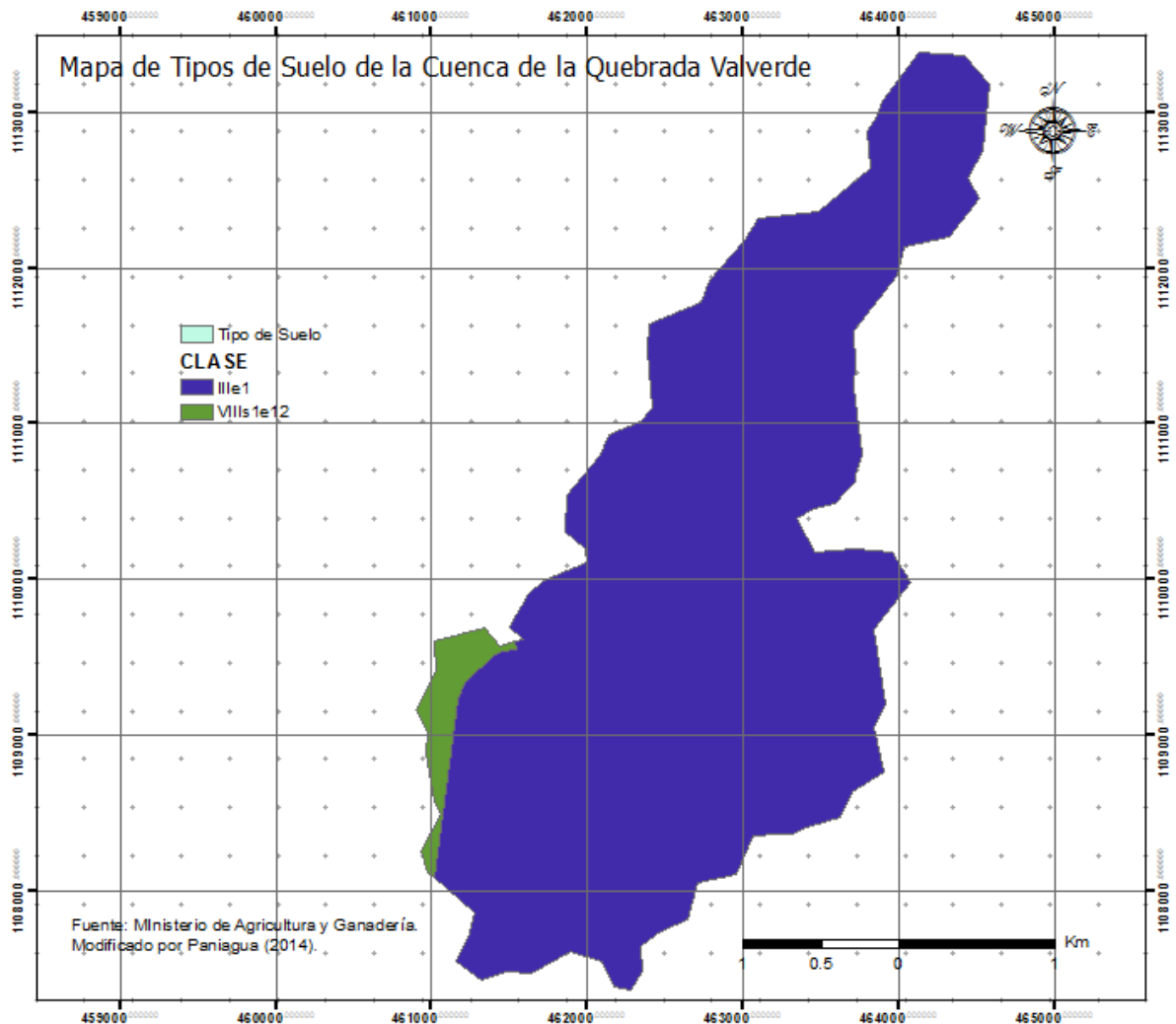
$$CN(I) = \frac{4,2CN(II)}{10 - 0,058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

En el caso de la cuenca de la Quebrada Valverde se considera que la condición que representa la información de suelo es la de antecedentes de humedad normales (AMC II). La clasificación de suelo en los grupos que define el NRCS se realizó con la información de los mapas del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).

La clasificación del suelo según los grupos hidrológicos que propone el NRCS se realiza con base en la información de suelos del MAG. Esta información se detalla en el mapa que se muestra en la Figura 34.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 34. Mapa de tipo de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1986. Modificado por Paniagua, 2016

A continuación se utiliza la descripción del suelo del Ministerio de Agricultura y Ganadería según el mapa de capacidad de uso de suelo.

El suelo tipo con capacidad de uso IIIe1 tiene una topografía escarpada, con pendientes entre 50%-80%. El uso de suelo actual es: tacotal, potrero, café y la capacidad de uso es VIIIIs1e12. Posee un clima húmedo y caliente. Tiene una precipitación anual entre 1900 mm-2400 mm. La temperatura media anual varía entre 21 °C-24 °C. Posee una condición de drenaje de bien drenado. El nivel freático es profundo. Tiene una rocosidad entre el 10%-40%. La textura es franco y franco arcillosa.



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

El régimen de humedad es Ustico – Udico. En el siguiente cuadro se resumen las características más importantes:

**Cuadro 8. Características del uso de Suelo VIIIs1e12**

<b>Capacidad de Uso de Suelo VIIIs1e12</b>	
<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Topografía	Escarpado
Pendiente	50%-80%
Capacidad de Uso de Suelo	VIIIs1e12
Clima	Húmedo y caliente.
Precipitación media	1900 mm-2400 mm
Temperatura media	21 °C-24 °C
Condición de drenaje	Bien drenado
Nivel freático	Profundo
Rocosisad	10%-40%
Erosión actual	Severa
Textura	Franco y franco arcilloso.
Color	Pardo
Ph	5,5
Porcentaje de saturación de bases	<35%
Porcentaje de materia orgánica	2%
Régimen de humedad	Ustico – Udico

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1986.

El suelo tipo con capacidad de uso VIIIs1e12. Tiene una topografía plana y ondulada. Uso actual: potrero, cítricos, maracuyá. Capacidad de uso IIIe1. Posee un clima húmedo y caliente. Tiene una precipitación anual entre 1900mm-2400mm. Temperatura media anual entre 21Cº-24Cº. Posee una condición de drenaje de bien drenado y excesivamente bien drenado. El nivel freático es somero. La textura es franco-limosa y franco arcillosa. El régimen de humedad es Udico. En el siguiente cuadro se resumen las características más importantes:

**Cuadro 9. Características del uso de Suelo IIIe1**

<b><i>Suelo IIIe1</i></b>	
<b><i>Característica</i></b>	<b><i>Valor</i></b>
Topografía	Escarpado
Pendiente	50%-80%
Capacidad de Uso de Suelo	IIIe1
Clima	Húmedo y caliente.
Precipitación media	1900mm-2400mm
Temperatura media	21 °C-24 °C
Condición de drenaje	Bien drenado
Nivel freático	Profundo
Rociedad	10%-40%
Erosión actual	Laminar leve
Textura	Franco limoso a franco arcilloso
Color	Pardo amarilento osucro a prado
Ph	6,1-6,6
Porcentaje de saturación de bases	Alto
Porcentaje de materia orgánica	Bajo
Régimen de humedad	Udico

Fuente: Ministerio de Agricultura y Ganadería, 1986.

Con base en la información del Cuadro 8 y Cuadro 9 se determina el grupo de suelo hidrológico de cada suelo caracterizado de la cuenca de la Quebrada Valverde. Para esto se utiliza la siguiente clasificación de suelos:

Grupo A: Es el que ofrece menor escorrentía. Incluye los suelos que presentan mayor permeabilidad, incluso cuando están saturados. Comprenden los terrenos profundos sueltos, con predominio de arena o grava y con muy poco limo o arcilla (Arenosos, arenosos-limosos, loes, etc.)

Grupo B: Incluye los suelos de moderada permeabilidad cuando están saturados. Comprendiendo los terrenos arenosos menos profundos que los del Grupo A, aquellos otros de textura franco-arenosa de mediana profundidad y los francos profundos.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Grupo C: Incluye los suelos que ofrecen poca permeabilidad cuando están saturados, por presentar un estrato impermeable que dificulta la infiltración porque, en conjunto, su textura es franco-arcillosa o arcillosa.

Grupo D: Es el que ofrece mayor escorrentía. Incluye los suelos que presentan gran permeabilidad, tales como los terrenos muy arcillosos profundos con alto grado de tumefacción, los terrenos que presentan en la superficie o cerca de la misma una capa de arcilla muy impermeable y aquellos otros con subsuelo muy impermeable próximo a la superficie.

Se utiliza la información del Ministerio del Medio Ambiente de España (1998), la cual se resume en el Cuadro 10, para definir el grupo hidrológico de cada suelo estudiado.

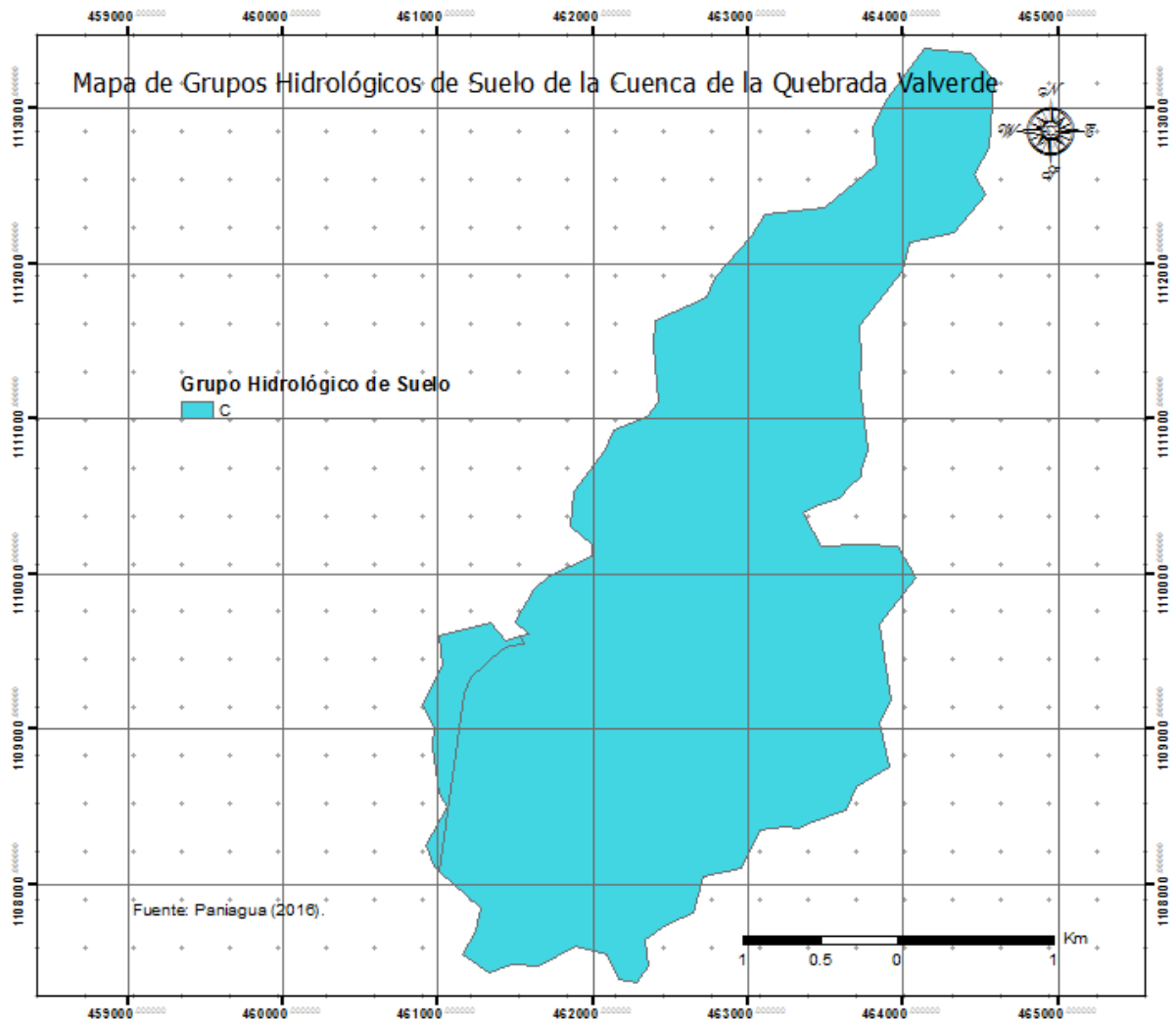
**Cuadro 10. Clasificación de grupos hidrológicos de suelos en función de su textura y condición de drenaje**

<i>Grupos hidrológicos de suelos</i>					
A	XII	Arenosa	B	VIII	Arenosa
	XI	Arenoso-franca		VII	Arenoso-franca
	IX	Franco-arenosa		X	Franco-arenosa
C	VI	Franco-arcillo-arenosa	D	III	Franco-arcillo-arenosa
	V	Franco-arcillo-limosa		II	Franco-arcillo-limosa
	IV	Franco-arcillosa		I	Franco-arcillosa

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente de España, 1998

Se define, a partir de esta información, que el suelo con capacidad de uso de suelo IIIe1 es un suelo que entra en el grupo hidrológico de suelo tipo C. El suelo con capacidad de uso de suelo VIIIs1e12 es un suelo que entra en el grupo hidrológico de suelo tipo C, como se muestra en la Figura 35.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 35. Mapa de Grupo hidrológico de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde**

Ahora, con la información obtenida del Cuadro 10, con la información de números de curva que se muestra en el Cuadro 11 y con la información de uso de suelo obtenida en el Cuadro 4, se obtiene el número de curva para las diferentes áreas de uso de suelo en la cuenca de la Quebrada Valverde.

**Cuadro 11. Números de curva para diferente uso de suelo y grupo hidrológico de suelo**

<i>Descripción del uso de la tierra</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	
<b>Tierra cultivada</b>	Sin tratamientos de conservación	72	81	88	91	
	Con tratamientos de conservación	62	71	78	81	
<b>Pastizales</b>	Condiciones pobres	68	79	86	89	
	Condiciones óptimas	39	61	74	80	
<b>Vegas de ríos</b>	Condiciones óptimas	30	58	71	78	
<b>Bosques</b>	Troncos delgados cubierta pobre, sin hierbas, cubierta buena	45				
			66	77	83	
<b>Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.</b>	Condiciones óptimas: cubierta de pasto en el 75% o más.	25				
	Condiciones aceptables: cubierta de pasto entre el 50% al 75%.	39				
<b>Áreas comerciales de negocios</b>	85% impermeables					
		49	69	79	84	
<b>Distritos industriales</b>	72% impermeables	89	92	94	95	
<b>Residencial</b>	Tamaño de lote	Porcentaje promedio impermeable	81			
	1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
	1/4 de acre	38	61	75	83	87
	1/3 de acre	30	57	72	81	86
	1/2 de acre	25	54	70	80	85
	1 acre	20	51	68	79	84
	Parqueos pavimentados, techos y accesos		98	98	98	98
<b>Calles y carreteras</b>	Pavimentados con cunetas y alcantarillados		98	98	98	98
	Grava		76	85	89	91
	Tierra		72	82	87	89

Fuente: NRCS, 1986

Con esta información se obtiene el Cuadro 12 en el cual se muestra los diferentes números de curva para los tipos de uso de suelo que existen en la cuenca de la Quebrada Valverde.

**Cuadro 12. Números de curva para los diferentes usos de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde**

<b>Grupo</b>	<b>Categoría</b>	<b>Grupo hidrológico de suelo</b>	<b>Número de Curva</b>
<i>Cobertura Vegetal</i>	Bosque de frondosas	C	77
	Café	C	78
	Caña de azúcar	C	78
	Charral	C	88
	Cuerpo de agua	C	71
	Frutal	C	88
	Hortalizas y granos	C	78
	Otros cultivos	C	88
	Parque	C	74
	Pasto	C	70
	Pasto con árboles dispersos	C	70
<i>Cobertura Urbana</i>	Vías	C	98
	Uso comercial	C	79
	Uso gubernamental	C	79
	Uso industrial	C	94
	Uso residencial	C	79

Fuente: NRCS, 1986. Modificado por Paniagua, 2016

Con los números de curva de los diferentes tipos de uso de suelo que existen en la cuenca de la Quebrada Valverde se calcula, mediante un promedio ponderado por áreas, el número de curva de la cuenca de la Quebrada Valverde.

**Cuadro 13. Cálculo del número de curva ponderado total de la cuenca de la Quebrada Valverde**

<b>Grupo</b>	<b>Categoría</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Número de Curva</b>
<i>Cobertura Vegetal</i>	Bosque de frondosas	391190,6	77
	Café	2025433,2	78
	Caña de azúcar	4722512,5	78
	Charral	244190,2	88
	Cuerpo de agua	3105,4	71
	Frutal	44083,5	88
	Hortalizas y granos	1078,3	78
	Otros cultivos	184537,3	88
	Parque	44301,6	74
	Pasto	160947,3	70
	Pasto con árboles dispersos	106900,7	70
<i>Cobertura Urbana</i>	Vías	83105,1	98
	Uso comercial	22061	79
	Uso gubernamental	47373,4	79
	Uso industrial	371493,8	94
	Uso residencial	1439241,4	79
Ponderado Total			79

Fuente: NRCS, 1986. Modificado por Paniagua, 2016

Se obtiene como resultado que la cuenca de la Quebrada Valverde posee un número de curva ponderado por área de 79. Este número de curva es un dato fundamental para de abstracciones iniciales.

## **5.2. Método de transformación**

Por la limitación de no tener registro histórico de caudales en la Quebrada Valverde, del cual se podría generar un hidrograma unitario, se debe optar por calcular este hidrograma utilizando algún modelo hidrológico.

### **5.2.1. Hidrograma unitario de Clark**

Este método se basa en que la superficie de la cuenca es dividida por líneas isócronas. Estas isócronas son líneas de igual tiempo de concentración, es decir, la precipitación que cae sobre esta línea dura el mismo tiempo en llegar al punto de control. Este método fue

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

desarrollado por Clark en 1943. Una de las premisas principales del método de Clark expresa que la cuenca funciona como un depósito. La cuenca tiene un efecto amortiguador, por la condición de depósito, entre el caudal que entra y el caudal que sale de ella. La manera más sencilla de considerar este efecto amortiguador que tiene la cuenca es considerándolo como un depósito lineal. Esto es, considerar que existe una relación lineal entre el volumen almacenado en el depósito y el caudal de salida:

$$S_t = R * O_t$$

Donde:

$S_t$  = Almacenamiento de la cuenca en el tiempo  $t$

$R$  = Coeficiente de almacenamiento de la cuenca

$O_t$  = Flujo de salida de la cuenca en el tiempo  $t$

Bajo el principio de conservación de la masa se deduce la siguiente ecuación. Esta ecuación se utiliza junto a la ecuación del almacenamiento lineal para obtener la fórmula principal del método de Clark.

$$I_t - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Donde,

$I_t$  = Caudal de entrada en el tiempo  $t$

$Q_t$  = Caudal de salida en el tiempo,  $t$

$\Delta t$  = incremento de tiempos entre los tiempos,  $t_{i-1}$ ,  $t_i$

Los caudales medios de entrada y de salida, a lo largo del intervalo de tiempo  $\Delta t$  se consideran como la media de los caudales en los extremos del intervalo de tiempo. Matemáticamente se puede expresar como:

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = \frac{S_i - S_{i-1}}{\Delta t}$$

Donde,



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

$I_{i-1} + I_i =$  Caudal de entrada en los tiempos,  $t_{i-1}, t_i$

$Q_{i-1} + Q_i =$  Caudal de salida en los tiempos,  $t_{i-1}, t_i$

$\Delta t =$  incremento de tiempos entre los tiempos,  $t_{i-1}, t_i$

$S_i + S_{i-1} =$  Volumen almacenado en la cuenca en los tiempos  $t_{i-1}, t_i$

Ahora, utilizando la primera ecuación, en la cual se define la linealidad que existe entre el caudal que sale y el almacenamiento de la cuenca, se obtiene la siguiente relación:

$$\frac{I_{i-1} + I_i}{2} - \frac{Q_{i-1} + Q_i}{2} = R * \frac{Q_i - Q_{i-1}}{\Delta t}$$

Donde,

$R =$  coeficiente de almacenamiento del deposito o embalse

Despejando el valor de  $Q_i$  se obtiene que,

$$Q_i = \frac{I_{i-1} + I_i}{2} * c + Q_{i-1} * (1 - c), \quad \text{siendo } c = \frac{2 * \Delta t}{2R + \Delta t}$$

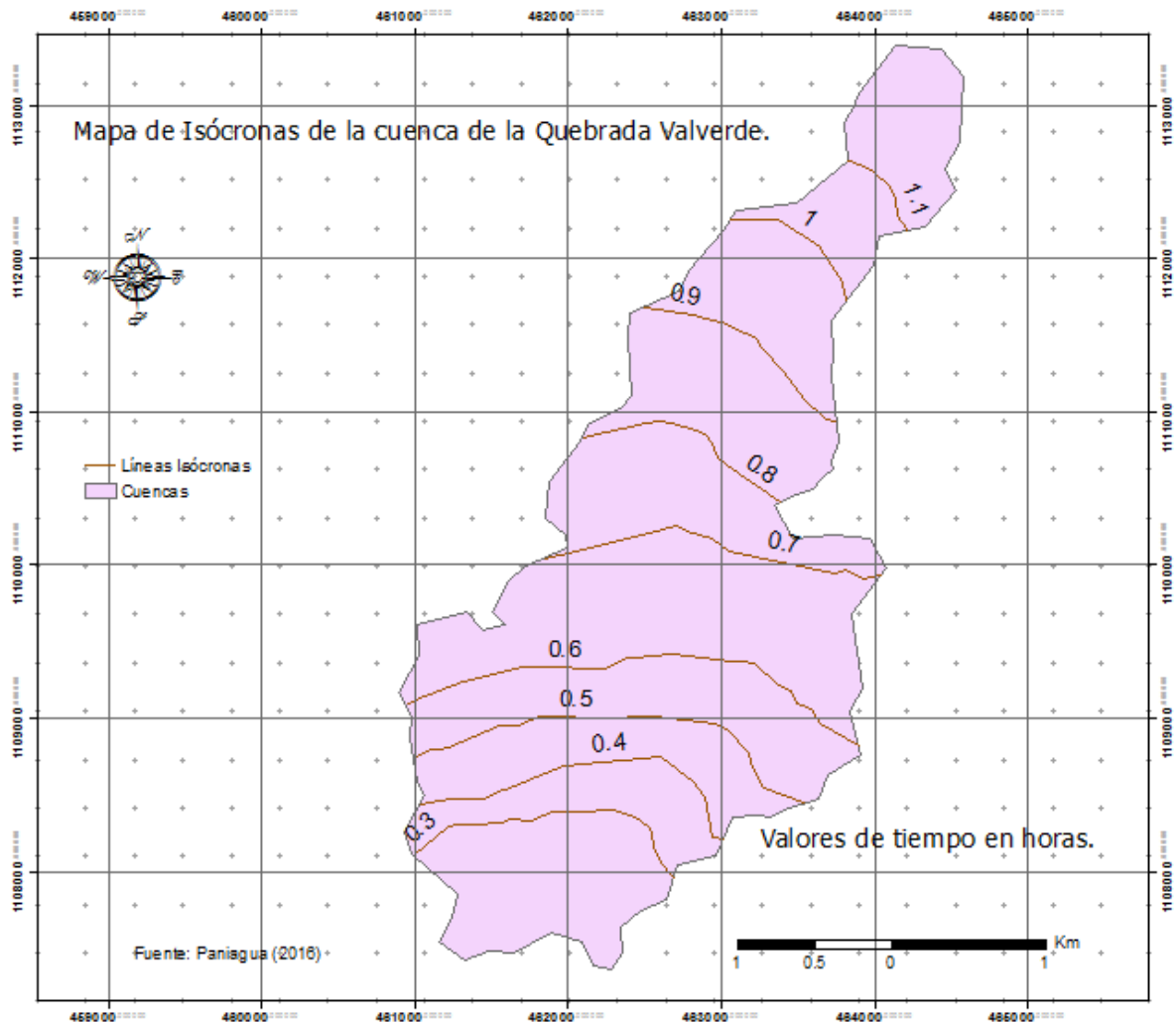
El coeficiente de almacenamiento debe ser calculador a partir de una calibración de la cuenca. Como en este caso no se tienen registros de caudales, el coeficiente de almacenamiento se debe calcular mediante una aproximación. Algunos autores sugieren utilizar un valor del 60% del tiempo de concentración, otros proponen utilizar un valor de 80%. Se utilizará la siguiente ecuación para estimar el coeficiente de almacenamiento:

$$R = 0,75 * t_c$$

El coeficiente de almacenamiento se calcula como un 75% del valor del tiempo de concentración.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Para el cálculo de las líneas isócronas se utilizó el programa computacional gratis SAGA GIS. Este programa tiene la capacidad de calcular, mediante el módulo de cálculo de isócronas con velocidad variable, el cálculo de isócronas tomando en cuenta elevaciones, pendientes, tipo de suelo, entre otras características. Se obtienen como resultado las isócronas que se muestran en la Figura 36.



**Figura 36. Mapa de Isócronas de la Cuenca de la Quebrada Valverde**

Como se observa en la Figura 36, la isócrona más distante es la de un tiempo de concentración de 1,1 h. Es decir, en 1,1 h, aproximadamente, toda la cuenca drena el agua caída en un instante definido.

### 5.3. Tránsito hidrológico

Para el tránsito hidrológico se utiliza el método de Muskingum. Este método se utiliza comúnmente para modelar las interacciones caudal-almacenamiento del cauce del cuerpo de agua estudiado. Es ampliamente utilizado para el tránsito hidrológico de ríos. La ecuación de tránsito de este método es la siguiente:

$$Q_{j+1} = C_1 I_{j+1} + C_2 I_j + C_3 Q_j$$

Donde,

$$C_1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t}$$

$$C_3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t}$$

Se cumple que,

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

Los valores de K y X se pueden determinar mediante hidrogramas de entrada y salida observados en el río. No obstante, como no se tienen datos medidos para generar hidrogramas de entrada y salida se debe aproximar estos valores.

K es una constante que tiene dimensiones de tiempo y se define como el tiempo de viaje de la onda a lo largo del tramo analizado.

$$K = \frac{\Delta x}{c_x} = \frac{\Delta x}{dQ/dA}$$

Por su parte, X es un factor que expresa la influencia relativa del caudal de entrada en los niveles de almacenamiento.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

$$X = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q}{B c_k S_0 \Delta x} \right)$$

Donde,

$c_k$  es la celeridad correspondiente a Q y B.

B es ancho de la superficie del agua.

$S_0$  es el almacenamiento inicial.

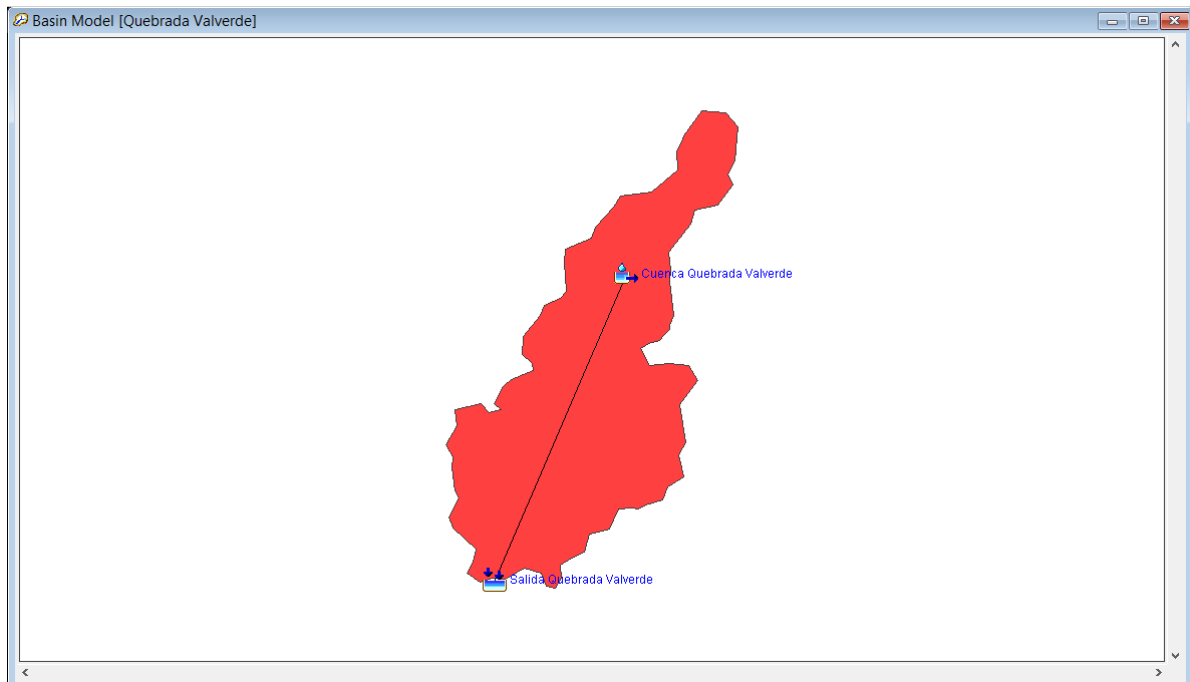
### **5.4. Flujo base**

El flujo base que pueda existir en la Quebrada Valverde se debe considerar a la hora de realizar el modelado hidráulico del evento de precipitación. No obstante, debido al pequeño tamaño de la cuenca de la Quebrada Valverde y a la relativamente pequeña duración de los eventos extremos de precipitación modelados (menos de 4 h), no se considera este flujo base en el análisis.

### **5.5. Hidrograma sintéticos**

Una vez corrido el modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde en el programa computacional HEC-HMS se obtiene el hidrograma de crecidas para cada periodo de retorno considerado. En la Figura 37 se muestra el esquema del modelo de la cuenca de la Quebrada Valverde obtenido del programa HEC-RAS.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

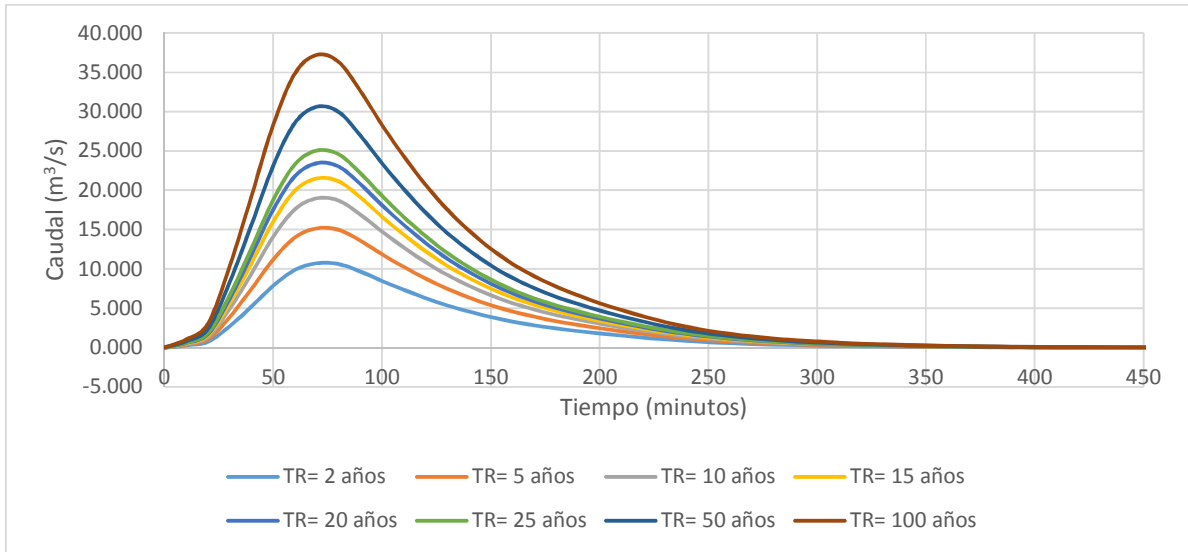


**Figura 37. Modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde en HEC-HMS**

### **5.6. Resultados del modelo**

En la Figura 38 se presentan los hidrogramas sintéticos obtenidos a partir del modelo hidrológico realizado con el programa HEC-HMS. Cada curva representa el hidrograma sintético para cada periodo de retorno considerado. Las tablas con los datos de caudal, volumen escurrido y precipitación de estos hidrogramas, se muestra en el apéndice.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 38. Hidrogramas sintéticos de la cuenca de la Quebrada Valverde.**

Es importante mencionar que los periodos de retorno que se muestran en la Figura 38 corresponden a los eventos de lluvia extrema diaria calculados en el Capítulo 4. Estos periodos de retorno no están asociados a los eventos de crecientes.

En el Cuadro 14 se muestra los caudales pico y los volúmenes escurridos de los hidrogramas sintéticos obtenidos del modelo hidrológico. El caudal pico para un periodo de retorno de 100 años (evento máximo de lluvia) es de 37,2 m<sup>3</sup>/s.

**Cuadro 14. Caudales pico y volúmenes de escorrentía de los hidrogramas sintéticos**

<b>Periodo de retorno de evento extremo de lluvia</b>	<b>Caudal pico</b>	<b>Volumen de escorrentía total</b>
(Años)	(m <sup>3</sup> /s)	(m <sup>3</sup> )
2	10,71	68500,2
5	15,16	96088,0
10	18,98	119667,1
15	21,50	135226,8
20	23,44	147213,0
25	25,04	157072,4
50	30,62	191414,5
100	37,22	232019,8

## **Capítulo 6. Modelo hidráulico**

Con los resultados del modelo hidrológico se procede a realizar el modelo hidráulico de un evento extremo en la cuenca de la Quebrada Valverde. Para el análisis hidráulico se utiliza el programa computacional HEC-RAS. Con esta herramienta se realizan cálculos hidráulicos de perfiles de flujo para canales no prismáticos utilizando un modelo unidimensional. En este capítulo se explica la información y parámetros utilizados para el modelo.

### **6.1 Secciones geométricas de la Quebrada Valverde**

Las secciones transversales se obtienen a lo largo del tramo de análisis. El tramo de análisis, como se define en el capítulo introductorio, comprende desde el inicio de la Quebrada Valverde (este punto tiene coordenadas CRTM05 (464305,1112705)) hasta el punto de control la intersección de la Quebrada Valverde con la Ruta Nacional 01, cerca de la FANAL con coordenadas CRTM05 (461636, 1107480).

Estas secciones transversales se obtienen mediante un levantamiento topográfico en sitio. Este levantamiento se realiza en el mes de abril del año 2016. Para este levantamiento se utiliza un equipo topográfico marca TOPCON, modelo GTS 226. El equipo utilizado se muestra en la Figura 39. Este equipo fue facilitado por el Centro de Investigaciones en Desarrollo Sostenible (CIEDES).



**Figura 39. Levantamiento de las secciones transversales en la Quebrada Valverde**





**Figura 40. Levantamiento de las secciones transversales en la Quebrada Valverde (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

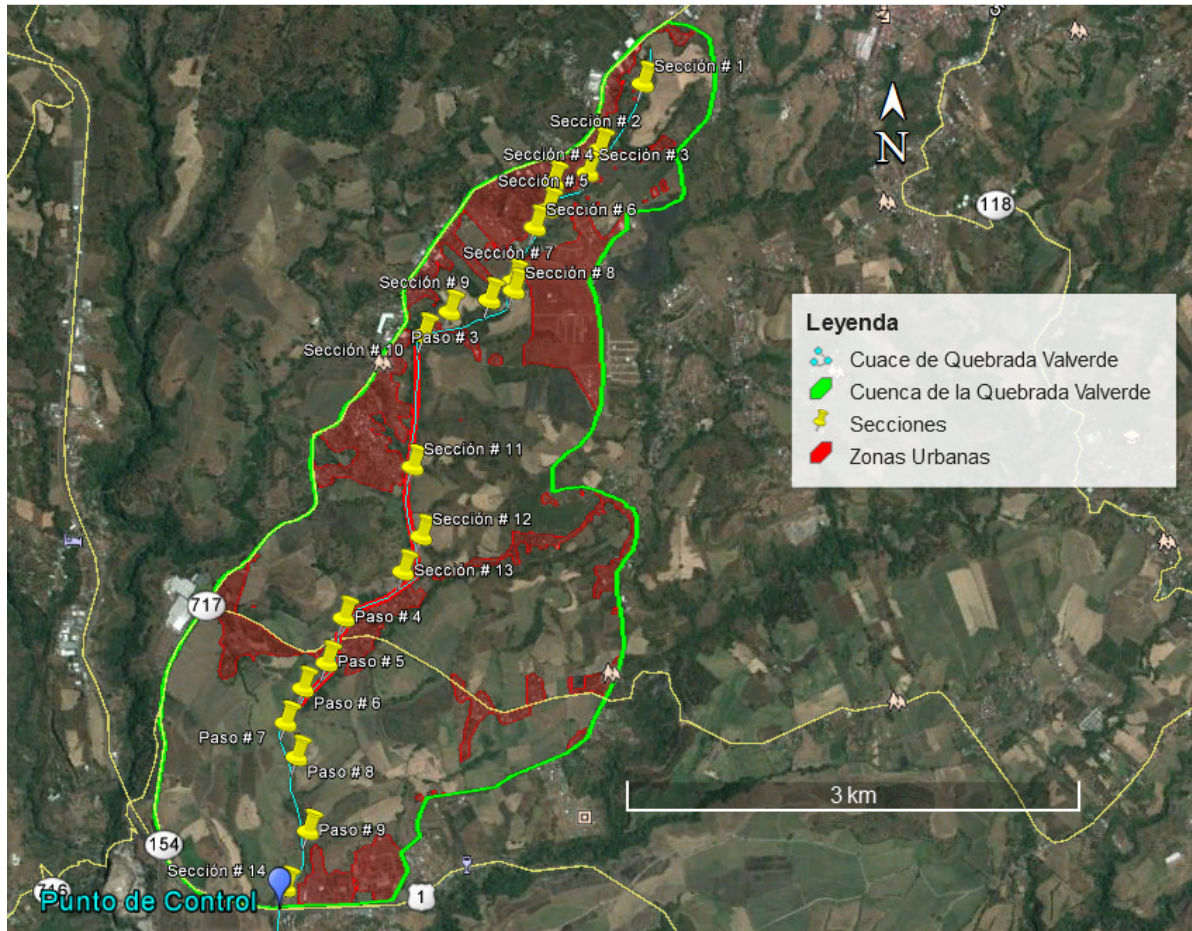
Con este procedimiento, se obtienen puntos con coordenadas y elevación, con los cuales se realiza un modelo digital de terreno. Con este modelo, se obtienen las secciones transversales del cauce de la Quebrada Valverde.

A la hora de escoger la cantidad y ubicación de las secciones hidráulicas es importante considerar las recomendaciones que ofrece el US Army Corps of Engineers, para la ubicación de las mismas. En general, como se trata de un análisis de flujo unidimensional se recomienda que las secciones sean perpendiculares al flujo de agua. Además, se recomienda ubicar las secciones donde existan cambios de pendiente, de dirección, de rugosidad y en aquellos lugares donde existan estructuras hidráulicas como un puente o una alcantarilla. US Army Corps of Engineers, en el Reference Manual del HEC-Ras hace las siguientes recomendaciones:

- Ubicar secciones en cambios de la forma de la sección
- Ubicar secciones en cambios bruscos de pendiente
- Ubicar secciones en cambios bruscos de rugosidad
- Ubicar secciones en estructuras hidráulicas

Con estas recomendaciones se define la ubicación de las secciones de la Quebrada Valverde. Las secciones transversales obtenidas se muestran en la Figura 41.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 41. Ubicación de las secciones transversales en el cauce de la Quebrada Valverde**

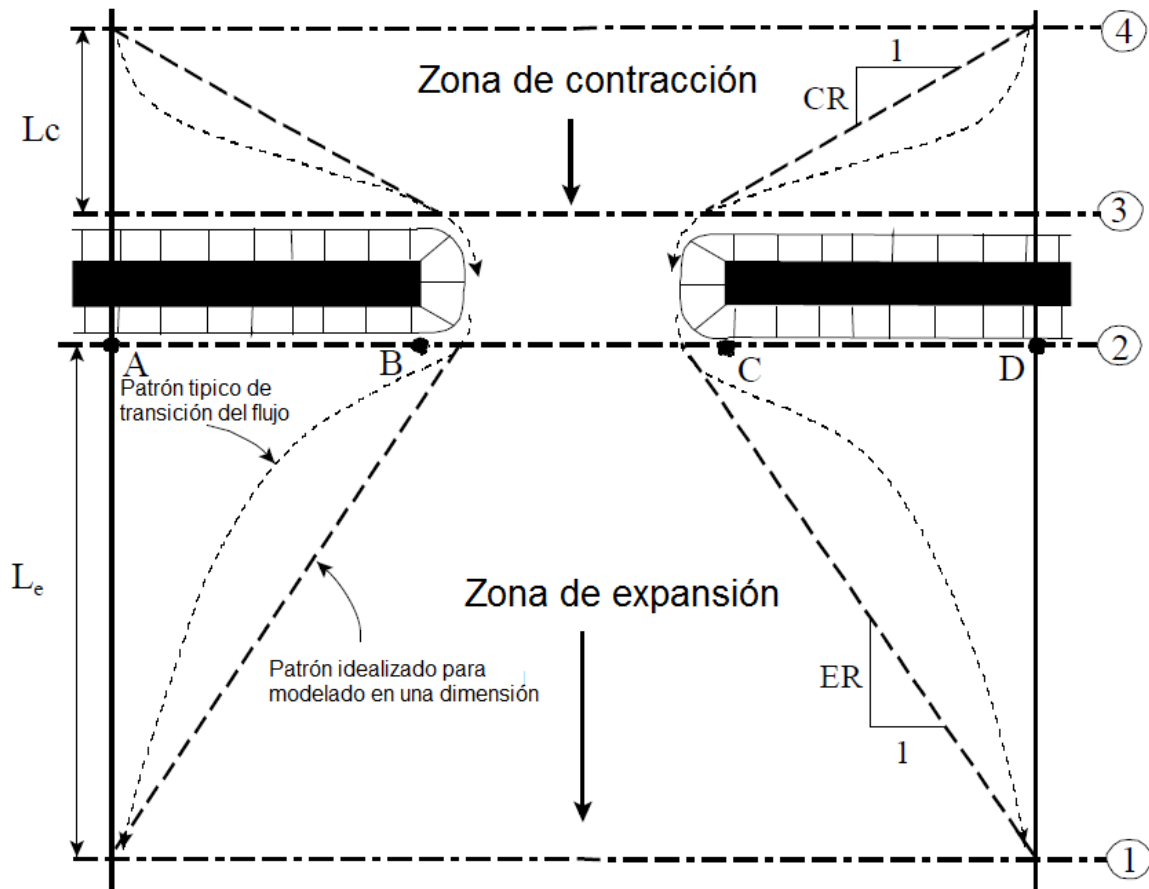
Es importante comentar que, en el mapa que se muestra en la Figura 41, cuando dice "Paso" en vez de "Sección", se entiende que hay una estructura hidráulica (puente o alcantarilla). En este caso, como se explica más adelante, se necesita obtener 4 secciones por paso hidráulico. Por otro lado, en la Figura 41 se muestra en color rojo las zonas urbanas. En estas zonas urbanas, las consecuencias de una inundación son más severas que en las zonas no urbanizadas. La lista de estas secciones y pasos se muestra en el Cuadro 15.

**Cuadro 15. Coordenadas geográficas de las secciones transversales de la Quebrada Valverde**

<b>Coordenadas Geográficas CRTM05</b>		
<b>Sección o Paso</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
Sección 1	468565,5	1113015,6
Paso 1	468358,9	1112687,5
Sección 2	468257,3	1112553,1
Sección 3	468199,4	1112418,7
Sección 4	467993,8	1112349,1
Sección 5	467898,4	1112175,2
Sección 6	467857,0	1112083,8
Paso 2	467816,1	1111992,4
Sección 7	467719,2	1111783,2
Sección 8	467694,3	1111652,8
Sección 9	467507,8	1111524,9
Paso 3	467259,2	1111480,5
Sección 10	467100,7	1111240,4
Sección 11	467056,2	1110721,0
Sección 12	467087,7	1110040,1
Sección 13	466986,6	1109761,4
Paso 4	466556,3	1109378,8
Paso 5	466467,5	1109147,3
Paso 6	466281,6	1108930,9
Paso 7	466190,6	1108746,4
Paso 8	466263,2	1108504,4
Paso 9	466325,9	1107991,9
Sección 14	466174,4	1107637,2

### **6.1.1 Estructuras hidráulicas sobre la Quebrada Valverde**

Quando existe una estructura hidráulica sobre el cuerpo de agua que se desea analizar hidráulicamente en el programa computacional HEC-RAS, el US Army Corps of Engineers, en el Reference Manual del HEC-RAS, recomienda realizar cuatro secciones por paso. Las cuatro secciones se deben ubicar de acuerdo con la Figura 42, Se debe sacar una sección en la zona de contracción, justo antes de la estructura hidráulica, justo después de la estructura hidráulica y en la zona de expansión.



**Figura 42. Ubicación de secciones para modelación de estructuras hidráulicas en HEC-RAS**

Fuente: USACE HEC, 2010

En el caso de los puentes no existe una relación exacta para obtener las distancias entre las secciones en las zonas de contracción y expansión. No obstante, puede aproximarse como cuatro veces la longitud promedio de las aproximaciones (valores AB y CD de la Figura 42) del puente para la sección aguas abajo de la zona de expansión; e igual al promedio de las aproximaciones del puente para la sección aguas arriba de la zona de contracción (Serrano, 2013).

### **6.1.2 Longitud entre secciones de estructuras hidráulicas**

Las distancias entre cada sección transversal de cada paso o estructura hidráulica se obtiene a partir del levantamiento topográfico. Estas distancias se diferencian entre el margen izquierdo y el margen derecho, pues es la manera en que se ingresan los datos en el HEC-RAS.

### **6.1.3 Coeficientes de pérdidas de energía**

Los cuerpos de agua poseen un equilibrio energético a lo largo de su recorrido. A lo largo del cauce hay cambios de dirección, cambios de geometría y cambios de rugosidad del fondo del cauce que producen pérdidas energéticas que controlan este balance energético. Estas pérdidas de energía son tomadas en cuenta en el modelo hidráulico mediante los coeficientes de expansión y contracción. Estos coeficientes representan fracciones de las cargas de velocidad que se pierden en estos cambios de condiciones en el cauce.

Estos coeficientes de expansión y contracción varían dependiendo del régimen del flujo analizado. En otras palabras, existen coeficientes de expansión y contracción para flujo subcrítico y flujo supercrítico.

**Cuadro 16. Valores de coeficientes de expansión y contracción**

<b>Régimen de Flujo</b>	<b>Tipo de Transición</b>	<b>Contracción</b>	<b>Expansión</b>
Subcrítico	Gradual	0,1	0,3
	Puente	0,3	0,5
	Severa	0,6	0,8
Supercrítico	Gradual	0,01	0,03
	Severa	0,6	0,2

Fuente: USACE HEC, 2010

### **6.1.4 Coeficiente de rugosidad Gaukler-Maning**

Un parámetro importante para conocer la capacidad hidráulica de una sección en particular es la rugosidad de la superficie de la misma. Este parámetro es considerado en el programa computacional HEC-RAS mediante el coeficiente de rugosidad Gaukler-Maning. Este coeficiente de rugosidad, como es de esperar, depende las características del fondo de la Quebrada Valverde.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Durante el levantamiento topográfico de las secciones transversales se realiza un levantamiento fotográfico que detalle las características del fondo de la Quebrada Valverde, esto a lo largo de cauce principal. Se compara estas imágenes con las que se presentan en el UGSC (1967) para comparación.



**Figura 43. Cauce de la Quebrada Valverde (1)**



**Figura 44. Cauce de la Quebrada Valverde (2)**

Utilizando el manual UGCS (1967) y las fotografías del cauce de la Quebrada Valverde se asigna un valor de coeficiente de rugosidad de Gaukler-Maning de 0,035 para el canal principal y un valor de 0,055 para las márgenes izquierda y derecha.



## **6.2 Modelado de estructuras hidráulicas**

La información geométrica de las estructuras hidráulicas se obtiene del levantamiento topográfico. Los puentes que se encontraron como pasos o estructuras hidráulicas consisten en rellenos de aproximación. La información geométrica fundamental para el modelado de puentes es la distancia de aproximación, pues estas distancias definen la ubicación de las cuatro secciones que se deben obtener por cada puente o estructura hidráulica que cruce el cuerpo de agua.

Las estructuras hidráulicas se modelan en el programa computacional HEC-RAS mediante puntos en el espacio. Estos puntos en el espacio le dan la geometría a la estructura hidráulica y fueron obtenidos del levantamiento topográfico.

## **6.3. Áreas no efectivas de flujo**

Las áreas no efectivas de flujo corresponden a las zonas donde el flujo tiene una velocidad de cero o cercana a este valor. Estas zonas se producen por los efectos de expansión y contracción generados por los rellenos de aproximación o bastiones de una estructura hidráulica. No es una tarea fácil definir con exactitud la ubicación de estas áreas no efectivas de flujo, es por esta razón que se utilizan aproximaciones para ubicarlas.

La zona de contracción se obtendrá al suponer una tasa de concentración de 1:1 entre la distancia de la sección aguas arriba de la estructura hidráulica y la distancia de estacionamiento para el área inefectiva del flujo, medido desde los bastiones o borde externo del relleno de aproximación hacia el margen del río. Para la zona de expansión se utilizará la premisa de que el ancho de la sección efectiva de flujo es igual al ancho de la sección del puente.

## **6.4. Método de cálculo**

El programa computacional HEC-RAS tiene la opción de escoger el método de cálculo, Para este trabajo se utiliza el método de paso estándar de remansos. Este método se fundamenta en el principio de energía y es aplicable para el caso de la Quebrada Valverde que se estudia en este trabajo. Por otro lado, cuando la capacidad de una estructura hidráulica se ve

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

comprometida, es decir, cuando el nivel del agua supera la elevación de la cota inferior de un puente se utiliza el método de flujo a presión.

### **6.5. Tipo de análisis de flujo**

El modelo hidráulico en el programa computacional HEC-RAS se realizará en condición de flujo permanente. Para realizar un análisis en condición de flujo no permanente se debe tener un modelo de terreno mucho más completo y detallado, es por esta razón que se utiliza el modelo en condición de flujo permanente.

### **6.5. Condiciones de contorno**

El programa computacional HEC-RAS, tiene como un insumo fundamental para el modelo hidráulico, las condiciones de contorno aguas arriba y aguas abajo de los límites del modelo. Para la condición de flujo subcrítico, se necesita ingresar la condición de contorno de aguas abajo. Para la condición de flujo supercrítico, se necesita ingresar la condición de contorno de aguas arriba. Para una condición de flujo mixta (flujo subcrítico y supercrítico) se debe ingresar ambas condiciones de contorno (aguas arriba y aguas abajo).

Como no se conoce *a priori* el régimen del flujo en la Quebrada Valverde bajo condiciones extremas de lluvia, se utiliza una condición de flujo mixta, previendo que existan ambos regímenes de flujo a lo largo del cauce principal. Se utiliza la profundidad normal para establecer las condiciones de contorno del modelo hidráulico de la Quebrada Valverde.

### **6.6. Resultados del modelo hidráulico**

Del modelo hidráulico se obtienen los niveles del agua en cada sección, y por ende, se conoce si las secciones están en capacidad de transitar el caudal obtenido del modelo hidrológico. De este modelo se obtiene que hay secciones en la Quebrada Valverde que no son capaces de transportar el caudal que se produce con eventos extremos. Este resultado se esperaba pues existe registro de inundaciones en las secciones donde el modelo hidráulico dicta que no hay capacidad suficiente.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

En el evento de inundación en la Quebrada Valverde registrado con un video queda en evidencia el nivel de agua que alcanzó la Quebrada Valverde en esta inundación. Se levanta con topografía, la altura del punto donde se observa que llega el nivel del agua en el video, como se observa en la Figura 45.



**Figura 45. Nivel de la Quebrada Valverde registrado en video de inundación.**

Fuente: Municipalidad de Grecia, 2010

La elevación medida en campo es de 744.35 m.s.n.m. Del análisis hidráulico se observa que corresponde a un evento de extremo de precipitación con un periodo de retorno de 25 años. Es decir, que la inundación registrada en el video corresponde a un lluvia extrema con un periodo de retorno de 25 años. Este video se grabó en el año 2014. En este año, según los registros de la estación hidrometeorológica de La Argentina Grecia, este año hubo una lluvia máxima diaria de 143.3mm. Los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia, se obtiene que para un periodo de retorno de 25 años se espera una lluvia máxima diaria de 133.58mm, utilizando la distribución VEG. Se observa que los valores de lluvia máxima diaria se aproximan,

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

lo que valida de cierta manera los resultados obtenidos en el modelo hidráulico, hidrológico y de análisis de frecuencia.

Los resultados obtenidos en el modelo hidráulico se discuten en el Capítulo 7. Análisis de resultados. Por otro lado, las secciones con los niveles de agua y perfiles, se muestran en el apéndice C.

## **Capítulo 7. Análisis de resultados**

En este apartado se comentarán y analizarán los resultados obtenidos en la caracterización de la cuenca de la Quebrada Valverde, el análisis de frecuencia, el análisis hidrológico y el análisis hidráulico.

### **7.1. Caracterización de la Cuenca**

En este capítulo se determinan parámetros que definen la geomorfología de la cuenca de la Quebrada Valverde. Por otro lado, se presentan mapas del tipo de suelo, geología, geomorfología y demás características que ayudarán a conocer de mejor manera la cuenca de la Quebrada Valverde y su comportamiento hidrológico.

Se calculan los parámetros morfológicos más comunes en estudios hidrológicos como lo es área, perímetro, longitud de cauce principal, entre otros. La cuenca de la Quebrada Valverde tiene un área de 10 km<sup>2</sup> aproximadamente. Tiene un índice de Gravelius de 1,63, lo cual habla de que la cuenca de la Quebrada Valverde tiene una forma medianamente redonda. Además, tiene una altura máxima de 958 m,s,n,m, una altura mínima de 670 m,s,n,m y una longitud del cauce principal de 8,21 km.

A partir del modelo de terreno digital se confecciona un mapa de distribución de pendientes en la cuenca de la Quebrada Valverde. Este mapa indica que las pendientes más frecuentes son las de 0%-11%. La pendiente es una variable que afecta la velocidad de flujo sobre la cuenca de la Quebrada Valverde, y por ende, el tiempo de concentración para cada espacio en la cuenca. Con pendientes bajas como estas se espera que el tiempo de concentración sea un poco mayor a la de una cuenca con características similares pero con pendientes mayores. Por otro lado, se obtiene la curva hipsométrica, la cual se observa en la Figura 13, La curva muestra que la cuenca de la Quebrada Valverde posee una pendiente sin cambios bruscos en la extensión de la cuenca.

Los mapas geológicos y geomorfológicos muestran que la cuenca de la Quebrada Valverde está conformada por coladas de lava, lahar, tobas y cenizas. Todo este material de

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

origen volcánico. Las formaciones geológicas identificadas bajo la superficie de la cuenca de la Quebrada Valverde son:

- Grupo Aguacate
- Formación Lavas Intracañón
- Formación Avalancha Ardiente
- Formación Barva
- Formación Lahares y Cenizas

Según la clasificación mundial de suelos de la FAO de las Naciones Unidas, los órdenes de suelo encontrado en la cuenca de la Quebrada Valverde son alfisoles e inceptisoles. Estos suelos, según la clasificación, son suelos relativamente jóvenes y poco desarrollados. Hidrológicamente son suelos que, al ser poco desarrollados poseen buena capacidad de infiltración.

El mapa de uso de suelo muestra que la cuenca de la Quebrada Valverde posee gran parte de su área en condición vegetal. Más de la mitad del área se encuentra dentro de categorías como bosque de frondosas, cultivos de café, pasto y otros que se consideran como cobertura vegetal. Solo aproximadamente el 13% de la superficie de la Quebrada Valverde se clasifica como cobertura urbana. Aunque la cuenca de la Quebrada Valverde ha sufrido por la urbanización y, consecuentemente, por la impermeabilización, aún gran parte de la cuenca de la Quebrada Valverde se mantiene con cobertura vegetal. Esto promueve en gran medida la infiltración de la precipitación. Cabe destacar que, como ya se mencionó, el mapa utilizado para conocer el uso de suelo de la cuenca de la Quebrada Valverde es el de PRUGAM, el cual fue confeccionado a partir de ortofotografías tomadas en el año 2005. Por esta razón, se inspecciona las fotografías satélites más actuales de Google Earth para conocer el aumento de la cobertura urbana. Se determina que la cobertura urbana aumentó 5% aproximadamente entre los años 2005 y el 2016.

Las zonas de vida que existen en la cuenca de la Quebrada Valverde se definen mediante el sistema de Holdridge, esto para correlacionar las zonas de vida con parámetros como temperatura, evapotranspiración y precipitación. Las zonas de vida que se encuentran en la

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

cuena de la Quebrada Valverde son *Bosque húmedo tropical de transición a premontano [bh-T12]*, *Bosque húmedo premontano [bh-P]*, *Bosque húmedo premontano [bmh-P]*, *Bosque húmedo premontano transición a basal [Bh-P6]*. En general, la clasificación por zonas de vida define que la cuena de la Quebrada Valverde posee temperaturas que varían entre 24 °C-30 °C y precipitaciones totales anuales entre 2000 mm-4000 mm.

### **7.2. Análisis de Frecuencia**

Se realiza un análisis de frecuencia con los datos hidrometeorológicos representativos de la zona donde se ubica la cuena de la Quebrada Valverde. Se utiliza la metodología de momentos lineales para el cálculo de los factores que definen la geometría de las distribuciones probabilísticas. Este método es alternativo a los métodos más convencionales, sin embargo, no presenta una dificultad mayor en el cálculo. Por otro lado, el análisis de momentos lineales ofrece mejores resultados que los métodos tradicionales.

Antes de comenzar con el método de momentos lineales, se trabajó para depurar los datos brutos de precipitación máxima diaria anual. A los datos iniciales se les hizo una prueba de datos dudosos para encontrar posibles datos que pudieran afectar los resultados del método de momentos lineales. Para esta prueba se utiliza la metodología presentada por el U,S Water Resources Council, la cual consiste en establecer umbrales permisibles para los datos dudosos altos y bajos. De esta prueba de datos dudosos se encontró un dato fuera de los rangos permisibles. Este dato correspondía al máximo diario anual del año 1955, el cual registra un valor máximo diario anual de 195,8 mm. El umbral superior de datos dudosos es de 177,8 mm. Por esta razón se omite el dato registrado del año 1955 para los cálculos del análisis de frecuencia.

Se calculan tres distribuciones de probabilidad a partir de los resultados obtenidos por el método de momentos lineales. Se utilizan las distribuciones Gumbel, VEG y Pearson Tipo III. Estas distribuciones se eligen porque son ampliamente aceptadas en la hidrología y particularmente dan buenos resultados cuando se trabaja con información de máximos de una variable, que en este caso es la máxima precipitación diaria anual. Se calculan las tres distribuciones, para luego escoger mediante un criterio probabilístico, la que mejor se ajuste. La distribución que resulte tener un mejor ajuste probabilístico es la que se utiliza para

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

continuar con el análisis hidrológico. En este estudio se escoge la distribución probabilística tipo Valor Extremo Generalizado, pues esta distribución es la que se ajusta mejor a los datos de campo. La prueba de ajuste o prueba de bondad que se utiliza es la prueba de Chi Cuadrado. Esta prueba compara las diferencias que existen entre los valores en campo con los valores medidos, y define de una manera cuantitativa, cual distribución se ajusta mejor que otra.

Por otro lado, se calculan los límites de confianza mediante el método de Maidment (1993), Se utiliza este método pues hace uso de los parámetros obtenidos por el método de los momentos lineales, Los límites o intervalos de confianza se grafican en la Figura 31.

En este análisis de frecuencia se utiliza solamente los datos de una estación hidrometeorológica (estación hidrometeorológica La Argentina, Grecia) a pesar de tener datos de otras estaciones cercanas. Esta decisión se toma porque la estación hidrometeorológica es representativa de la zona donde se encuentra la cuenca de la Quebrada Valverde. Para llevar a esta conclusión se realiza un mapa de isoyetas para ver la representatividad que tiene cada estación sobre el área de la cuenca de la Quebrada Valverde. De este mapa de isoyetas se obtiene que la única estación que tiene influencia sobre el comportamiento de lluvias en el área de la Quebrada Valverde es la estación La Argentina, Grecia. Este resultado se esperaba pues, casualmente, la estación La Argentina Grecia, se ubica dentro del área de la Quebrada Valverde y las demás estaciones se encuentran lo suficientemente lejos para no tener injerencia sobre el comportamiento de precipitaciones en la cuenca de la Quebrada Valverde. Otro aspecto importante es que la estación. La Argentina Grecia tiene el registro más largo de todos, sin ningún dato faltante. Por estas razones se utiliza únicamente esta estación para el análisis de frecuencia,

### **7.3. Análisis hidrológico**

Se realiza un modelo hidrológico utilizando el programa computacional HEC-HMS, Se utiliza la información obtenida del capítulo de caracterización de la cuenca de la Quebrada Valverde y los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia. Para realizar este modelo, se definen varios aspectos del modelo hidrológico como lo es: el método de pérdidas o



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

abstracciones iniciales a utilizar, el método para el cálculo del hidrograma sintético, el método de tránsito hidrológico y los coeficientes de estos métodos.

El método utilizado para obtener las pérdidas o abstracciones iniciales es el del NRCS, En este método se debe definir con gran detalle el tipo de suelo en la extensión de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se utiliza la información de suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería para definir el grupo hidrológico del suelo y, junto a la clasificación por uso de suelo que se presenta en el Cuadro 4 y el Cuadro 10. Se define el grupo hidrológico de cada uso de suelo. Se obtiene un número de curva total de la cuenca de la Quebrada Valverde mediante un promedio ponderado por área y se obtiene como resultado un número de curva para la cuenca de la Quebrada Valverde de 79. Un número de curva de esta magnitud corresponde a una superficie medianamente impermeable. Para entender un poco mejor el significado del número de curva, un valor de número de curva de 0 significa que en la superficie hay 0 escurrimiento mientras que para un valor de curva de 100, toda la precipitación pasa a ser escurrimiento.

El método para obtener el hidrograma sintético que es el método de las isócronas o método de Clark. Este método no presenta mayor dificultad en el cálculo, no obstante, obtener las líneas isócronas puede resultar complicado. Para el cálculo de las líneas isócronas se utiliza un SIG que obtiene las isócronas a partir del modelo digital de terreno y número de curva de la cuenca en estudio. El mapa de isócronas de la cuenca de la Quebrada Valverde se muestra en la Figura 36. Se observa de este mapa que la mayor isócrona es de un valor de 1,3 horas aproximadamente.

El método de Clark, como todos los métodos sintéticos, necesita de un parámetro o coeficiente que se debe calcular a partir de un hidrograma medido en campo. El parámetro en el caso del método de Clark es el coeficiente de almacenamiento. No obstante, como no se tienen mediciones de caudales en la Quebrada Valverde, se debe utilizar un método alternativo. Lo recomendable en estos casos es utilizar el coeficiente de almacenamiento de una cuenca con parámetros morfológicos semejantes, sin embargo, no existe un estudio hidrológico que se haya utilizado el método de isócronas en una cuenca de Costa Rica semejante a la cuenca

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

de la Quebrada Valverde. Es por esto, que se utiliza, aunque no se recomienda, una fórmula empírica para el cálculo del coeficiente de almacenamiento.

Para el tránsito hidrológico de crecientes se utiliza el método de Muskingum-Cunge. Este método permite trasladar el hidrograma unitario desde un punto a otro. Para utilizar este método, es importante tener información geométrica completa y definir bien los coeficientes de rugosidad Gaukler-Manning.

Los hidrograma unitarios que se obtienen del modelo hidrológico con el programa computacional HEC-HMS representan los eventos de precipitación extrema que se han registrado a través de los datos hidrometeorológicos de la estación La Argentina, Grecia, a pesar de que no se calibraron con tormentas específicas.

### **7.4. Análisis Hidráulico**

El modelo hidráulico se lleva a cabo en el programa computacional HEC-RAS. Para este modelo se utilizaron un total de 50 secciones obtenidas de un levantamiento topográfico. En este levantamiento topográfico también se obtiene la información geométrica de las estructuras hidráulicas, que se utiliza para el modelado de las secciones con puente o alcantarillas. La ubicación de estas secciones se obtuvo a partir de las recomendaciones que ofrece el US Army Corps of Engineers, en el Reference Manual del HEC-RAS. Estas secciones fueron suficientes para identificar las zonas donde hay potencial de inundación. En caso de que se necesite conocer exactamente las zonas inundables, y obtener manchas de inundación más exactas, se debe trabajar con un modelo de flujo no permanente. Para llevar a cabo un análisis de este tipo de se debe tener un levantamiento topográfico total del cauce del cuerpo de agua y no solo secciones transversales, como se hizo en este trabajo.

El programa computacional HEC-RAS utiliza un método de cálculo de pérdidas de energía que es aplicable para la estructuras hidráulicas en modeladas, si y solo si, se sigue las recomendaciones que ofrece el Reference Manual del HEC-RAS. Se recomienda obtener 4 secciones para cuando hay una estructura hidráulica; dos aguas abajo y dos aguas arriba de la estructura hidráulica en cuestión, como ese muestra en la Figura 42. El programa

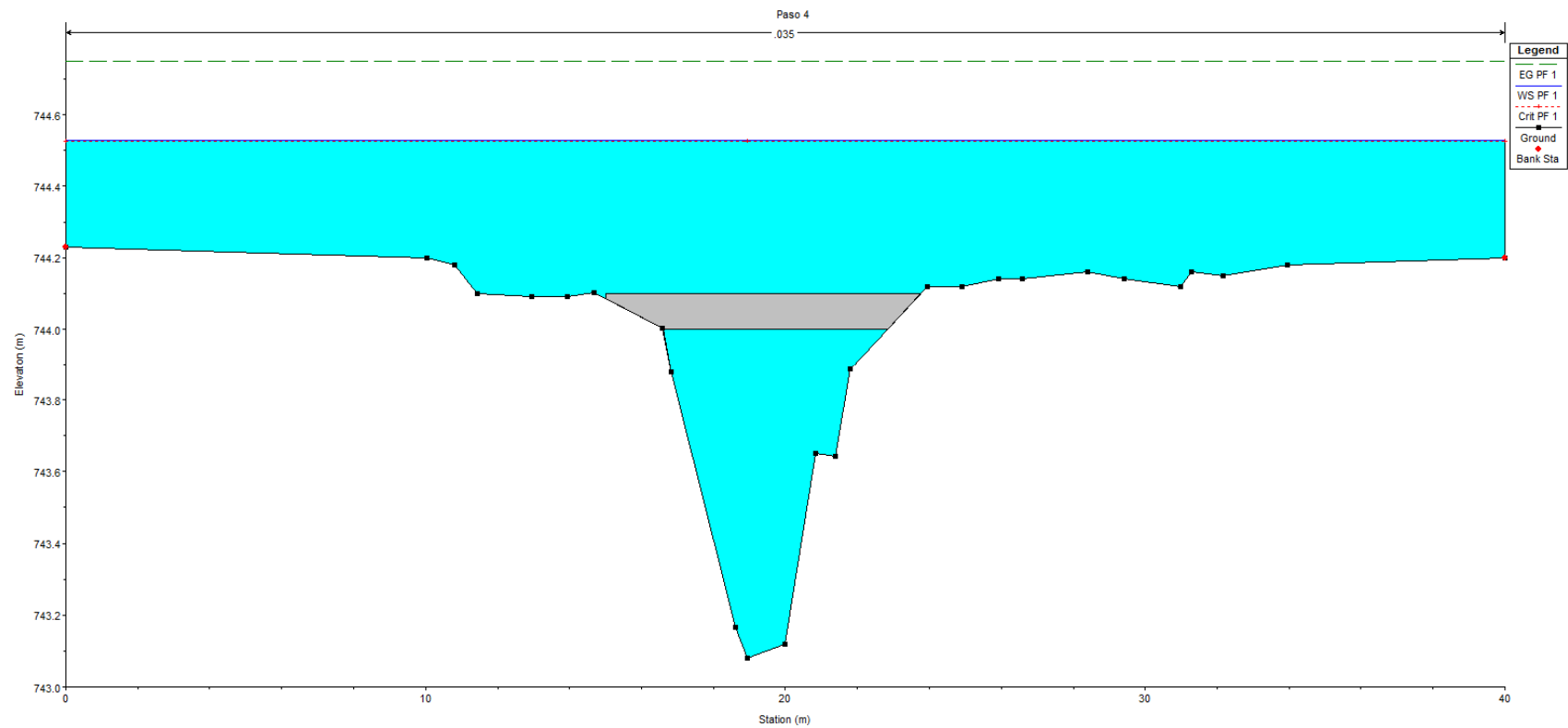
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

computacional HEC-RAS cambia de método de cálculo de pérdidas energéticas cuando el puente o alcantarilla se sumerge y funciona como un tubo a presión.

A partir de los resultados que se obtienen del modelo hidráulico del programa computacional HEC-RAS se observa que los eventos de precipitación extrema para periodos de retorno de 2,5, y 10 años son no comprometen la capacidad hidráulica de las secciones transversales de la Quebrada Valverde analizadas. Sin embargo, a partir del evento de precipitación extrema de periodo de retorno de 15 años, el paso # 4, el cual se conoce como sector el Raicero, empieza a tener problemas de inundación. En el sector Raicero se han registrado, mediante fotos y videos realizados por ciudadanos, inundaciones en el puente que cruza la Quebrada Valverde. Este resultado es importante porque valida, de cierta manera, los resultados obtenidos.

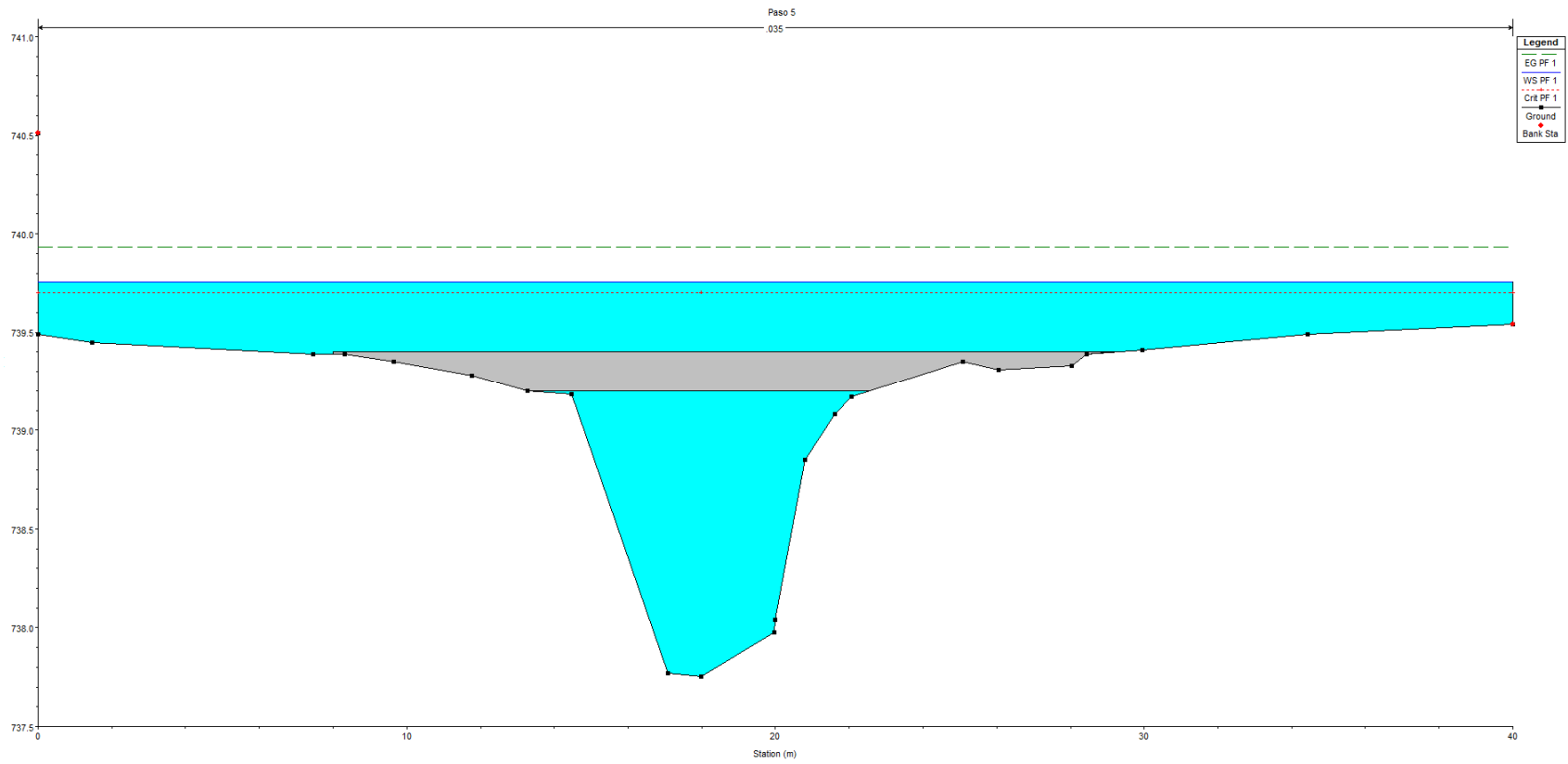
Por otro lado, para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, las secciones de los pasos hidráulicos # 5 y # 6 presentan una capacidad insuficiente para transportar el caudal que se genera en un evento de precipitación máxima. En otras palabras, estas zonas se inundan para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. En estas zonas no se tiene registro de inundaciones. Sin embargo, esta zona es de uso agrícola y no existen casas ni edificios en las márgenes. Es probable que hayan ocurrido inundaciones en esta zona sin ser registrados formalmente (sin embargo, no hay manera de confirmar esto). Al no causar pérdidas económicas o daños, el incidente pierde relevancia. No obstante, sería un error no considerar este resultado en un futuro desarrollo de esta zona y en la planeación urbana del cantón de Grecia.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



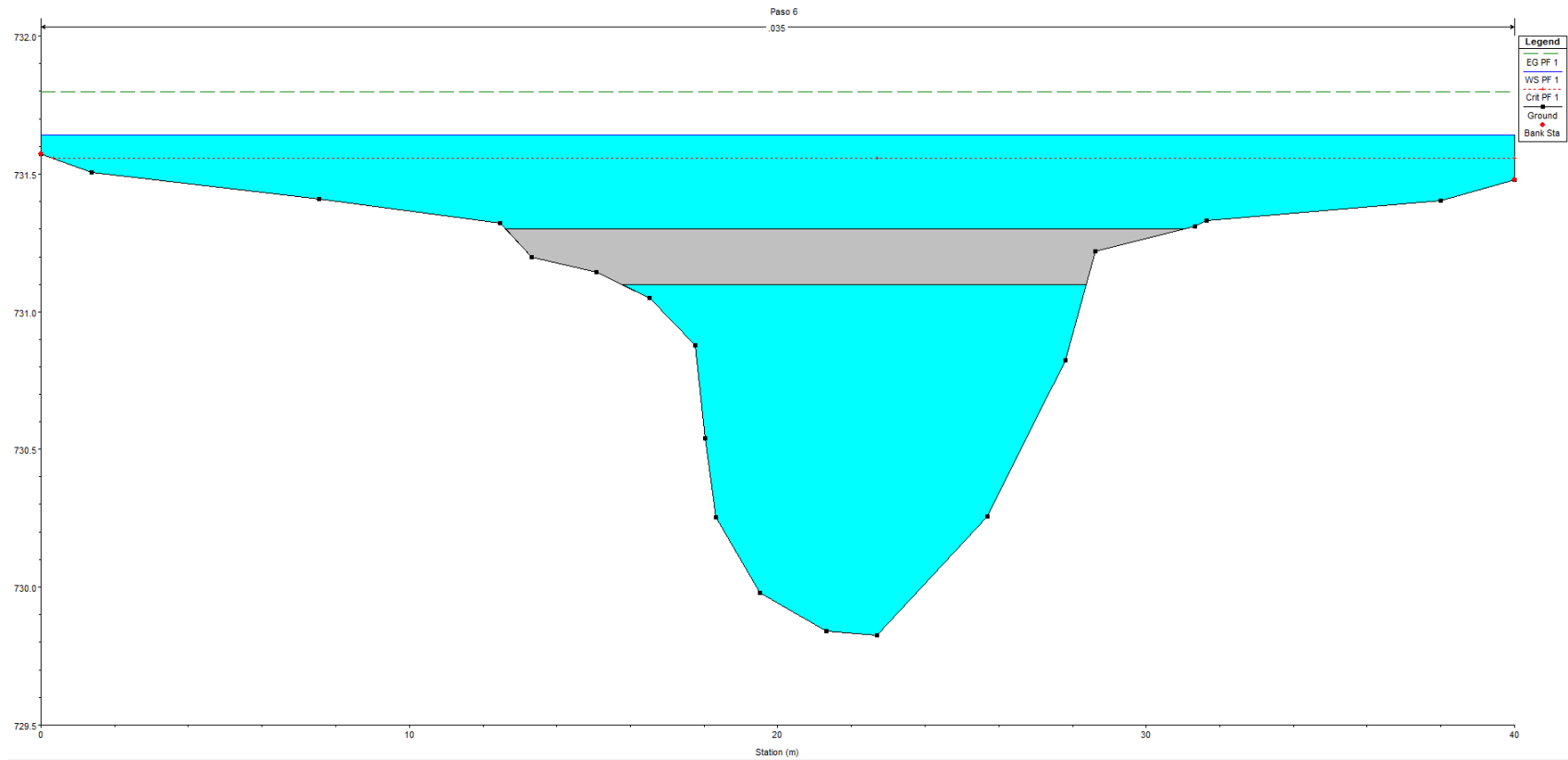
**Figura 46. Modelo hidráulico de la Sección de la Quebrada Valverde en el paso hidráulico # 4.**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 47. Modelo hidráulico de la Sección de la Quebrada Valverde en el paso hidráulico # 5.**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 48. Modelo hidráulico de la Sección de la Quebrada Valverde en el paso hidráulico # 6**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

El cultivo que se encuentra en los márgenes de los pasos hidráulicos # 5 y # 6 es de caña. Este cultivo es utilizado por la Cooperativa Victoria par la producción de azúcar y es una de las actividades económicas más importantes del cantón de Grecia.

La inundación parcial o total del cultivo de caña puede causar daños en la planta, Cuando la raíz del cultivo de caña se encuentra saturado produce un estrés de tipo secundario (hipoxia) que perjudica a las plantas terrestres. Este estrés es secundario, pues el agua no es tóxica (estrés primario), sin embargo, produce un descenso en la capacidad de captación de oxígeno del cultivo. Es por esta razón que en zonas inundadas, el suelo tiene poca capacidad de aportar oxígeno a la raíces. Esta deficiente suministro de oxígeno afecta el crecimiento de la planta (Rodríguez, 2007).

Algunos efectos fácilmente observables de un cultivo que tenga estrés secundario por inundación son:

- Disminución de la tasa de crecimiento
- Engrosamiento de los tallos
- Epinastía (Plantas con los tallos caídos)

Si la deficiencia de oxígeno persiste en las raíces de los cultivos, las plantas adquieren características típicas de déficit hídrico, las hojas se secan y mueren. Esto ocurre porque no existe un transporte del oxígeno pues no se tiene el gradiente iónico necesario (Rodríguez, 2007).

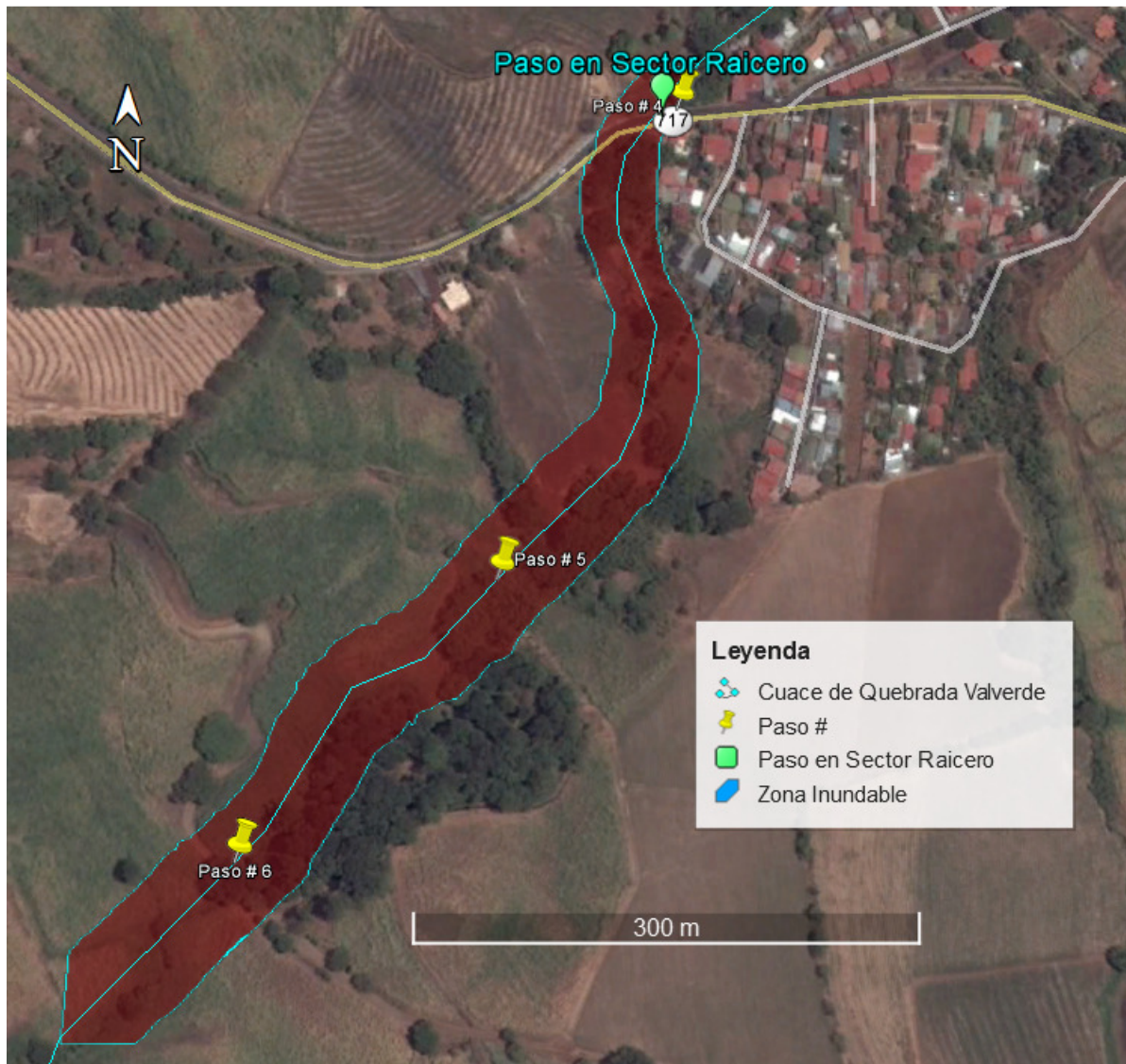
Por otro lado, las inundaciones también tienen consecuencias positivas en el medio ambiente, Especialmente para el caso que se tiene en los pasos hidráulicos # 5 y # 6 del cauce de la Quebrada Valverde. Las inundaciones promueven la recarga de los mantos acuíferos. Al ocurrir una inundación se cubre de agua superficies que generalmente no estaban inundadas, y de esta manera, mediante la filtración se promueve la recarga de los mantos acuíferos, los cuales son una fuente de agua potable. También, las aguas que lleva el río acarrear sedimentos y nutrientes de las zonas aguas arriba del cauce, Estos sedimentos se depositan en las planicies

### Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

inundadas enriqueciendo el suelo. Esto tiene como consecuencia una fertilización de los suelos y una mejora en los suelos para la actividad agrícola.

Por último, con las cotas de elevaciones del nivel del agua del modelo hidráulico con un evento de precipitación de 100 años se confeccionan las manchas de inundación en las márgenes de la Quebrada Valverde. Estas manchas se presentan en la Figura 49, en el mapa de susceptibilidad a amenazas debido a inundaciones urbanas. Este mapa debe ser tomado en cuenta para la confección del mapa de amenazas naturales del plan regulador del cantón de Grecia. Este mapa se muestra en la Figura 7, sin embargo, el mapa se encuentra desactualizado.





**Figura 49. Manchas de zonas susceptibles a inundación en las márgenes de la Quebrada Valverde**

Fuente: Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

## **Capítulo 8. Soluciones y recomendaciones**

En este capítulo se entra en detalle acerca de las medidas y recomendaciones que se deben tomar para el manejo integral de inundaciones de la cuenca de la Quebrada Valverde. Se darán alternativas a los diferentes problemas que se identificaron en el capítulo del análisis hidráulico e hidrológico. Este capítulo es de gran utilidad para los encargados del gobierno local del cantón de Grecia, pues aquí se presentan medidas para la prevención de inundaciones en la Quebrada Valverde.

Existen muchas medidas para el manejo de inundaciones. Es posible reducir el volumen escurrido o disminuir el caudal, en caso de un evento extremo. Es posible aumentar la capacidad hidráulica del cauce en las zonas de inundación. Inclusive hay medidas políticas para rebajar las probabilidades de inundaciones. Todas estas medidas se pueden combinar y complementar entre sí para tener un plan integral de manejo de inundaciones. En general, se clasifican en soluciones estructurales y soluciones no estructurales.

Se diseñarán las soluciones en el plano hidráulico. Se excluye el diseño estructural y geotécnico de las soluciones propuestas.

### **8.1. Soluciones y recomendaciones estructurales**

Las soluciones estructurales son las que involucran la construcción de estructuras artificiales en una configuración geométrica tal que, evite que el cuerpo de agua se desborde. Estas soluciones generalmente son muy exitosas y tienen un gran impacto sobre el cuerpo de agua que interviene. En la mayoría de los casos, estas soluciones, modifican el ecosistema generando impacto ambiental. Por otro lado, las soluciones estructurales suelen involucrar el almacenamiento de grandes cantidades de agua, por lo que en caso de que fallen, las consecuencias negativas pueden llegar a ser peores que la condición de inundación natural. Es por esta razón que se debe ser muy cuidadoso y prudente a la hora del diseño de estas soluciones.

### **8.1.1. Represas**

Una represa es la clásica solución estructural. Una represa es una gran pared que se construye perpendicular al flujo de agua, impidiendo el paso del flujo de agua. De esta manera se genera un reservorio, aguas arriba, al cual se le puede regular el caudal de salida de manera que se eviten las inundaciones. Además de ser muy efectivas evitando las inundaciones, las represas se aprovechan para la producción eléctrica lo cual genera beneficios económicos en la zona. Por otro lado, el agua que se retiene aguas arriba de la represa, puede ser utilizada como una fuente del preciado recurso hídrico.

La solución de la represa no es factible para cuerpos de agua pequeños, como lo es el de la Quebrada Valverde que transporta un caudal de  $5\text{m}^3/\text{s}$  para un evento de precipitación con periodo de retorno de 1 año. Además de que generar un reservorio no es posible pues los alrededores de la Quebrada Valverde están poblados por zonas urbanizadas.

### **8.1.2. Diques**

Los diques son estructuras que se ubican paralelas al flujo del agua que forman una barrera física y evitan que se desborde el agua en un evento extremo de precipitación. Los diques aumentan la capacidad hidráulica del canal natural. Se colocan en las zonas donde hay más riesgos de inundación. Una ventaja de utilizar la solución de los diques es que permite al cuerpo de agua que se desarrolle la inundación. No obstante, si los diques fallan, las consecuencias de la inundación serán peores a las consecuencias que se hubieran tenido en caso de no tener los diques. Es por esto que se deben diseñar con prudencia.

Los diques son una solución estructural factible para los problemas de inundación de la Quebrada Valverde. Como se observa de los resultados obtenidos del modelo hidráulico de la quebrada se identifican zonas de eventual inundación. La implementación de diques en los márgenes de zonas de riesgo de inundación representa una posibilidad para evitar inundaciones en la Quebrada Valverde.

### ***8.1.3 Desvío de aguas***

El desvío de aguas consiste en construir canales artificiales donde el río descarga el exceso de escorrentía. Estos canales envían el agua a otros ríos, o bien, descarga el agua en el mismo cuerpo de agua aguas abajo, en una zona sin riesgos de inundación. Esta solución necesita de una gran inversión inicial, además de espacio para construir los canales de desvío de escorrentía.

En el caso de la Quebrada Valverde, utilizar desvío de aguas como medida para el manejo de inundaciones no es una opción factible. Esto porque se necesita mucho espacio para la construcción de los canales de desvío, espacio que es muy escaso alrededor del cauce de la Quebrada Valverde.

### ***8.1.4 Lagunas o tanques de retención***

Las lagunas de retención o tanques de retención funcionan como estructuras que poseen un volumen destinado a almacenar el exceso de escorrentía. Estas estructuras entran en acción cuando la capacidad hidráulica del canal o del cuerpo de agua se ve comprometida. El exceso de escorrentía se almacena en las lagunas o tanques y se dispone cuando el evento extremo haya pasado y no haya riesgo latente de inundación. Una de las lagunas de retención del proyecto residencial Montezuma, el cual se ubica en la cuenca de la Quebrada Valverde se muestra en la Figura 50. Esta laguna se construyó realizando un movimiento de tierras para conformar la forma del volumen de retención y además se cubrió este volumen con una superficie impermeable.



**Figura 50. Laguna de retención en funcionamiento**

## **8.2. Soluciones y recomendaciones no estructurales**

Las soluciones no estructurales se enfocan en reducir los impactos de una eventual inundación en vez de prevenirlos. La principal ventaja de las soluciones no estructurales es que su implementación no tiene un costo elevado comparado con las soluciones estructurales. Las soluciones no estructurales son más económicas que las estructurales, por lo que se acomodan a la situación de los países en vías de desarrollo. Por otro lado, requieren menos tecnología, por lo que pueden ser implementadas por mano de obra no calificada. Estas soluciones son más amigables con el ecosistema que los rodea y tienen costos de mantenimiento menores a los de soluciones no estructurales.

### **8.2.1 Reforestación**

Reforestación envuelve la plantación de árboles en la cuenca en cuestión. Plantar árboles aumentará la capacidad de almacenamiento, y al mismo tiempo, aumenta las abstracciones iniciales (lluvia que retiene o captura la flora) cuando ocurre un evento de precipitación. Esto a su vez, disminuirá la escorrentía y el riesgo de inundación. Por otro lado, los árboles previenen que se erosione suelo y consecuentemente, se evita que lleguen sedimentos al cauce del cuerpo de agua. Los sedimentos le restan capacidad hidráulica al cuerpo de agua, por lo que plantando árboles, se evita indirectamente que disminuya la capacidad hidráulica del cuerpo de agua. Combinar la solución de reforestación con el uso de zonas de inundación puede ser muy efectivo en la reducción de inundación.

Otro aspecto positivo de la solución de reforestación es que crea nuevos hábitats para los animales y genera un impacto ambiental positivo. Por otro lado, la reforestación mejora la calidad de agua escurrida filtrando los contaminantes de la lluvia. Utkina (2011).

Se propone reforestar un área de 30000 m<sup>2</sup> del área total de la cuenca de la Quebrada Valverde. Con este aumento de uso de suelo, se logra disminuir el número de curva a un 77. Este cambio en el uso de suelo disminuirá la escorrentía que se produce ante un evento de precipitación. Por ejemplo, para el periodo de retorno de 100 años la escorrentía baja 3mm. El área por reforestar puede ubicarse en cualquier zona de la cuenca de la Quebrada Valverde y queda sujeta a limitaciones legales y políticas de la Municipalidad de Grecia.

La desventaja de la reforestación es que necesita grandes extensiones de bosque para hacer efecto. Este espacio suele ser escaso, y en el caso de la Quebrada Valverde, lo es. En el caso de la Quebrada Valverde se propone reforestar 30 hectáreas. Por otro lado, los efectos positivos se empiezan a notar cuando los arboles hayan crecido, lo cual puede tomar entre 5-10 años.

### **8.3. Políticas y planeación urbana**

Las soluciones estructurales y no estructurales deben ir acompañas con políticas de ordenamiento territorial para tener un manejo integral de las inundaciones. Es aquí donde el

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

gobierno local de Grecia debe tomar la posición de protagonista pues es el que tiene el poder de dictar políticas en pro de un buen manejo integral de las inundaciones.

El plan regulador es la mejor arma que tiene la Municipalidad de Grecia para el ordenamiento territorial. Dentro de la planificación urbana debe incluirse un enfoque de ordenamiento territorial que permita el manejo de la cuenca así como la prevención de inundaciones. La mayoría de gobiernos locales de Costa Rica solicitan a los desarrolladores de proyectos de gran tamaño (proyectos con un área mayor a 1 hectárea) utilizar medidas como las lagunas de retención para contrarrestar el impacto hidrológico generado sobre la cuenca por el proyecto. No obstante, las municipalidades son más permisivas cuando se trata de proyectos pequeños, como lo son las casas o comercios pequeños. Gran parte de la superficie impermeable en la cuenca de la Quebrada Valverde se debe a proyectos pequeños (proyectos con un área menor a 1 hectárea) que de manera singular producen una impermeabilización despreciable, pero el efecto de impermeabilización sumado de todos los pequeños proyectos, produce un efecto similar o mayor al de un proyecto grande (proyectos con un área mayor a 1 hectárea) y es por esta razón que se da un fenómeno de aumento de escorrentía por impermeabilización.

Se debe aumentar el control del exceso de escorrentía urbana producida por proyectos de mayor tamaño, mediante requisitos de desfogue pluvial, como lo son las lagunas de retención, reforestación, diques, entre otras. Por otro lado, el gobierno local debe

Por otro lado, se deben buscar tomar acciones políticas para disminuir los riesgos por inundación. Para esto se debe incentivar los programas y voluntariados de limpieza de los cuerpos de agua. Esto con el fin de dejar el cuerpo de agua libre de desechos sólidos que provoquen un efecto presa. Y por otro lado se logra concientizar a los ciudadanos sobre la importancia de los cuerpos de agua.

### **8.3.1 Zonificación y ordenamiento territorial**

El plan regulador es el arma por excelencia para el buen ordenamiento territorial que tiene el gobierno local. En este plan se debe considerar, de manera integral, el manejo de la cuenca de la Quebrada Valverde y la prevención de posibles inundaciones.

Una buena planificación urbana que contemple de manera integral el comportamiento hidrológico del cantón, ayudará a disminuir las probabilidades de inundación en los cuerpos de agua del cantón. Medidas puntuales como:

- Prohibir estrictamente permisos de construcción en las márgenes de los cuerpos de agua y en las zonas inundables con eventos de precipitación extrema con un periodo de 100 años.
- Exigir la liberación de las áreas que se encuentren dentro de las márgenes de los cuerpos de agua y en las zonas inundables que se encuentran ocupadas por construcciones o viviendas.
- Exigir a los grandes desarrolladores, medidas para garantizar que se contrarreste el impacto hidrológico generado por los desarrollos. Estas medidas pueden ser lagunas o tanques de retención.
- Revisión y ampliación del sistema de alcantarillado del cantón.
- Definir, mediante un estudio, las zonas inundables a lo largo de los cuerpos de agua y hacer esta información de dominio público. Para la Quebrada Valverde, se puede utilizar los resultados obtenidos en este trabajo.

### **8.4. Soluciones consideradas para la cuenca de la Quebrada Valverde**

En este apartado se describen las soluciones y recomendaciones que se consideran aplicar en la cuenca de la Quebrada Valverde.

#### **8.4.1 Diques en la Quebrada Valverde**

Las secciones del paso # 4 tienen problemas de capacidad. De los resultados del análisis hidráulico se obtiene que estas zonas son propensa a inundaciones. Un evento de precipitación con un periodo de retorno de 15 años es suficiente para comprometer la capacidad de estas



## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

secciones. En esta zona, como se ha comentado anteriormente, se han registrado inundaciones, como se muestra en la Figura 5. Esta zona se conoce como el sector Raicero y está urbanizada, por lo que una inundación puede tener como consecuencias: daños materiales, afectaciones en la infraestructura de la zona e inclusive comprometer la salud de los vecinos del sector Raicero.

En esta zona con susceptibilidad a inundaciones se propone utilizar una medida no estructural para prevenir que las casas y comercios del sector Raicero sean afectados por una inundación. Esta medida son los diques. Se escoge esta medida porque se dispone con espacio limitado, además de que es una zona urbanizada y una inundación pondría tener consecuencias graves, como anteriormente se mencionó. Se utiliza un muro de concreto reforzado como dique con una sección trapezoidal. Las dimensiones de esta sección se muestran en la Figura 122.

En esta zona, los márgenes de la Quebrada Valverde se encuentran invadidas por los vecinos, como se observa en la Figura 51, por lo que se debe entrar en un proceso de recuperación de la zona de protección del cauce para implementar esta medida. Para librar estas zonas, se debe entrar en este proceso necesitará de un esfuerzo legal y político sostenido. La construcción de diques a lo largo de la Quebrada Valverde es una solución de alto costo económico. La ubicación de los diques propuestos se muestra en la Figura 51.



**Figura 51. Ubicación de Diques en Sector Raicero (2)**

Fuente: Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

En la Figura 51 se muestra la ubicación de los diques propuestos con líneas punteadas de color morado. En esta imagen satelital se observa que los diques propuestos interfieren con algunas construcciones, lo que significa que se debe recuperar estas zonas para poder construir los diques. Por otro lado, la construcción de estos diques constituye un límite físico de las márgenes del cauce que puede eventualmente interferir con el desarrollo natural de la Quebrada Valverde, modificando de esta manera el balance energético y produciendo un impacto ambiental. Por las razones anteriormente mencionadas se desestima la solución de los diques y no se recomienda utilizarla en la Quebrada Valverde.

**8.4.2 Zonas inundables en las márgenes de la Quebrada Valverde**

De los resultados del análisis hidráulico se obtuvo que se inundan las secciones de los pasos # 5 y # 6. Estas son las secciones que siguen después de las secciones del sector el Raicero. En las zonas # 5 y # 6 no se registran inundaciones, contrario a la zona del sector Raicero. Las zonas de los pasos # 5 y # 6 son de uso agrícola y no hay edificaciones o residencias.

Implementar zonas inundables permitirá que se lleve a cabo la inundación sin comprometer la seguridad de los vecinos del Sector Raicero. Se delimita espacialmente la zona inundable, la cual se muestra en la Figura 52. Estas zonas inundables corresponden a las producidas para un evento de precipitación extrema con un periodo de retorno de 100 años. Estas zonas inundables se obtuvieron utilizando el nivel máximo en cada sección del paso hidráulico, obtenido con el análisis hidráulico.

Las zonas inundables propuestas tienen un área total de 23269m<sup>2</sup>. Actualmente estas zonas son de propiedad privada, por lo que se tiene que entrar en un proceso de recuperación de las tierras que forman el cauce natural de la Quebrada Valverde.



**Figura 52. Propuesta de zonas Inundables en las márgenes del cauce de la Quebrada Valverde.**

Fuente: Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

Estas zonas inundables actualmente tienen un uso agrícola. El cultivo que se encuentra en los márgenes de los pasos hidráulicos # 5 y # 6 es de caña. Este cultivo es utilizado por la Cooperativa Victoria para la producción de azúcar y es una de las actividades económicas más importantes del cantón de Grecia.

La inundación parcial o total del cultivo de caña puede causar daños en la plantación. Cuando la raíz del cultivo de caña se encuentra saturada produce un estrés de tipo secundario

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

(hipoxia) que perjudica a las plantas. Este estrés es secundario, pues el agua no es tóxica (estrés primario), sin embargo, produce un descenso en la capacidad de captación de oxígeno del cultivo. Es por esta razón que en zonas inundadas, el suelo tiene poca capacidad de aportar oxígeno a la raíces. Esta deficiente suministro de oxígeno afecta el crecimiento de la planta (Rodríguez, 2007).

Algunos efectos fácilmente observables de un cultivo que tenga estrés secundario por inundación son:

- Disminución de la tasa de crecimiento
- Engrosamiento de los tallos
- Epinastía (Plantas con los tallos caídos)

Si la deficiencia de oxígeno persiste en las raíces de los cultivos, las plantas adquieren características típicas de déficit hídrico, las hojas se secan y mueren. Esto ocurre porque no existe un transporte del oxígeno pues no se tiene el gradiente iónico necesario (Rodríguez, 2007).

Por otro lado, se debe construir infraestructura para desfogar las aguas pluviales almacenadas en estas zonas inundables. Se debe contar con un cabezal de entrada y tubería pluvial que transporte la escorrentía al cuerpo de agua con un caudal. El esquema propuesto del sistema de desfogue de aguas se muestra en la Figura 123.

Por otro lado, permitir que las inundaciones se desarrollen también tiene consecuencias positivas. Especialmente para el caso que se tiene en los pasos hidráulicos # 5 y # 6 del cauce de la Quebrada Valverde. Las inundaciones promueven la recarga de los mantos acuíferos. Al ocurrir una inundación se cubre de agua superficies que generalmente no estaban inundadas, y de esta manera, mediante la filtración se promueve la recarga de los mantos acuíferos, los cuales son una fuente de agua potable. También, las aguas que lleva el río acarrear sedimentos y nutrientes de las zonas aguas arriba del cauce. Estos sedimentos se depositan en las planicies inundadas enriqueciendo el suelo. Esto tiene como consecuencia una fertilización de los suelos y una mejora en los suelos para la actividad agrícola.

### ***8.4.3 Instrumentación de la cuenca de la Quebrada Valverde***

Para continuar con un plan integral de manejo de la cuenca de la Quebrada Valverde es esencial darle continuidad a la recopilación de información hidrometeorológica. Para realizar estudios hidrológicos e hidráulicos es indispensable medir datos de lluvia, datos de caudales de la Quebrada Valverde y mantener un modelo de terreno digital actualizado y detallado.

En el caso de la Quebrada Valverde, se tiene una estación pluviográfica dentro de la cuenca. Esa estación, llamada estación la Argentina de Grecia, es administrada por IMN y posee un registro de 74 datos consecutivos desde 1937 hasta el 2014. No obstante, la Quebrada Valverde no posee registro de caudales. Tampoco se conoce la distribución de intensidad en el tiempo.

Se debe ubicar una estación fluviográfica en el paso hidráulico # 9. Se escoge esta ubicación porque es de fácil acceso, pues tiene una calle que llega a este paso hidráulico. Por otro lado, es una zona que no está urbanizada por lo que se cuenta con el espacio para colocar el equipo fluviógrafo. Otra razón por la cual se escoge este paso es porque, según el análisis hidráulico, el paso # 9 no se presenta inundaciones inclusive para un evento de precipitación extrema de periodo de retorno 100 años.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 53. Ubicación del paso # 9.**

Fuente: Google Earth, 2016. Modificado por Paniagua, 2016

Es importante mencionar que esta estación fluviográfica requiere de mantenimiento periódico que garantice el buen funcionamiento del equipo. También se debe calibrar las curvas de descarga para registrar los datos de caudal correctos. La municipalidad de Grecia debe designar un responsable para la operación y mantenimiento de la estación fluviográfica, y de mantener actualizadas las curvas de descarga.

### ***8.4.4 Dragado del cauce de la Quebrada Valverde***

El dragado del cauce de la Quebrada Valverde es una solución que se propone para disminuir las probabilidades de inundaciones en los márgenes de la Quebrada Valverde. Esta medida se debe implementar sino se construye el dique.

La acción de dragar el cauce de la Quebrada Valverde tiene como consecuencia el aumentar la capacidad de transporte. Esta medida parece ser ideal, pues al aumentar la capacidad del cauce se evitarían las inundaciones para los periodos de retorno de diseño. Sin embargo, dragar o ampliar las secciones transversales de la Quebrada Valverde puede modificar el balance energético y las condiciones aguas arriba o aguas abajo de la zona de

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

intervención. Un dragado compromete el desarrollo natural del río y degenera sus condiciones naturales. Se necesita de estudios más rigurosos para poder diseñar un dragado para el cauce de la Quebrada Valverde. Es por esta razón que no se recomienda realizar un dragado en el cauce de la Quebrada Valverde por la falta de estudios necesarios y por los efectos negativos que tendrá la quebrada por el dragado.

### ***8.4.5 Políticas de protección del cauce de la Quebrada Valverde***

Por permisividad del gobierno local y por osadía de los vecinos de la Quebrada Valverde, los ciudadanos han logrado invadir el cauce de la Quebrada Valverde y construir en la zona de protección del cauce, como se observa en la Figura 49. Muchos de los invasores son los que han sido afectados por las inundaciones registradas en la Quebrada Valverde. El gobierno local debe ser contundente en la recuperación de estas zonas del cauce de la Quebrada Valverde que han sido invadidas por los vecinos. Esto para garantizar el desarrollo natural del cuerpo de agua (Quebrada Valverde) y la seguridad de los vecinos de Grecia. La municipalidad debe tomar las siguientes acciones haciendo uso de los diferentes mecanismos políticos:

- Levantamiento topográfico del cauce de la Quebrada Valverde para identificar cuales vecinos invaden las zonas de protección de la Quebrada Valverde.
- Recuperar la propiedad de zonas invadidas del cauce de la Quebrada Valverde.
- Liberar las zonas invadidas del cauce de la Quebrada Valverde de estructuras. Estas zonas deben quedar en estado natural.
- No otorgar, bajo ninguna circunstancia, permisos de construcción en zonas del cauce de la Quebrada Valverde.

El gobierno local de Grecia puede tener problemas para recuperar y liberar la propiedad de zonas invadidas del cauce de la Quebrada Valverde por un tema de derechos de los ciudadanos. Es en este momento donde la municipalidad de Grecia debe aplicar medidas políticas que promuevan la liberación de estas zonas. Entre las medidas políticas que puede tomar el gobierno local de Grecia están:

- Aumento en los impuestos a los bienes inmuebles que invadan las zonas del cauce de la Quebrada Valverde.



### Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

- Denegatoria de permisos de construcción en zonas del cauce de la Quebrada Valverde.
- Denegación de servicios a propietarios de bienes inmuebles que invaden las zonas del cauce de la Quebrada Valverde.

#### **8.4.6 Políticas de ordenamiento territorial**

Como se mencionó anteriormente, el gobierno local posee una poderosa herramienta con el plan regulador municipal. En este plan regulador se pueden establecer normas de ordenamiento territorial que permitan un mejor manejo de la escorrentía en la cuenca de la Quebrada Valverde. Es importante que el gobierno local no permita, bajo ninguna circunstancia, la invasión de la zona de protección de la Quebrada Valverde para evitar problemas por eventos extremos de precipitación en la cuenca de la Quebrada Valverde. Para lograr proteger la zona de protección de la Quebrada Valverde, la municipalidad debe:

- Realizar un levantamiento topográfico a lo largo de las márgenes de la Quebrada Valverde.
- Realizar un estudio catastral para identificar los vecinos directos del cauce de la Quebrada Valverde.
- Revisar periódicamente, mediante un levantamiento topográfico comparativo, que los vecinos no hayan invadido el cauce de la Quebrada Valverde.

#### **8.5. Soluciones para la cuenca de la Quebrada Valverde**

En el apartado anterior se consideraron las soluciones no estructurales y estructurales. Entre las soluciones estructurales se estudiaron los casos de los diques, zonas inundables y dragados. Las soluciones no estructurales analizadas fueron: instrumentación de la cuenca, política de protección del cauce de la Quebrada Valverde y política de ordenamiento territorial. Del análisis del apartado anterior se concluye que las medidas estructurales son costosas, producen un impacto ambiental negativo y se necesitan más estudios (como estudios de sedimentos y de balance energético) para un diseño de las soluciones que garantice un buen funcionamiento hidráulico del cuerpo de agua. Es por estas razones que se desestiman estas soluciones y no se recomienda utilizar soluciones estructurales en la Quebrada Valverde. Por

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

otro lado, las soluciones no estructurales probaron no producir un impacto ambiental negativo y garantizar un buen funcionamiento hidráulico del cuerpo de agua, por lo que se recomienda utilizar todas las soluciones no estructurales propuestas. Las soluciones se deben implementar en el siguiente orden de prioridad:

- Políticas de protección del cauce de la Quebrada Valverde
- Políticas de ordenamiento territorial
- Instrumentación de la cuenca de la Quebrada Valverde.

## **Capítulo 9. Conclusiones y recomendaciones**

En este capítulo se entrará en detalle en las conclusiones finales y recomendaciones que se obtienen a partir de los resultados de este trabajo.

### **9.1. Conclusiones**

En este trabajo se logró caracterizar la cuenca de la Quebrada Valverde, donde se definen características físicas, climáticas, tipo de suelo y uso de suelo de la cuenca. Se definió el área de la cuenca de la Quebrada Valverde utilizando como punto de control la intersección de la Quebrada Valverde con la Ruta Nacional 01, cerca de la Fábrica Nacional de Licores con coordenadas CRTM05 (461636, 1107480). La cuenca tiene un área aproximada de 10 km<sup>2</sup>, posee pendientes bajas, siendo el rango 0%-11% el más frecuente; y ha sufrido cambios en el uso de su superficie (un aumento de la superficie urbana del 4,9%) que han aumentado la escorrentía en la cuenca.

Se logró conseguir información de precipitación fidedigna para conocer el comportamiento de los eventos de lluvia sobre la cuenca de la Quebrada Valverde. Utilizando como fuente de datos el Instituto Meteorológico Nacional se obtuvo un registro de lluvias

### Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

máximas diarias de 73 años consecutivos. Mediante un análisis de frecuencia, utilizando como información principal los datos del Instituto Meteorológico Nacional, se obtienen las lluvias máximas diarias asociadas a periodos de retorno. La precipitación total en un evento de precipitación máxima diaria con un periodo de retorno de 100 años es de 180 mm.

Además, se realizó un modelo hidrológico de la cuenca de la Quebrada Valverde. En este modelo se utilizaron los resultados obtenidos en la caracterización de la cuenca, los resultados obtenidos del análisis de frecuencia, el histograma calculado por Murillo (1994) y la metodología del hidrograma sintético de Clark. Con esto se obtuvieron los hidrogramas de respuesta que se generan en la Quebrada Valverde cuando ocurre un evento de precipitación extremo con periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 20, 25, 50, 100 años. Estos hidrogramas son el insumo principal para el análisis hidráulico de la Quebrada Valverde.

También, se desarrolló un modelo hidráulico de la Quebrada Valverde con el cual se definió la capacidad hidráulica de la Quebrada Valverde a lo largo de su cauce principal. Analizando la capacidad hidráulica de cada sección de la Quebrada Valverde, se definieron las zonas de inundación para una lluvia de periodo de retorno de 100 años. A partir de los resultados que se obtuvieron del modelo hidráulico con el programa computacional HEC-RAS, se observó que los eventos de precipitación extrema para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años no comprometen la capacidad hidráulica de las secciones transversales de la Quebrada Valverde analizadas. Sin embargo, a partir del evento de precipitación extrema de periodo de retorno de 15 años, el paso # 4, el cual se conoce como sector el Raicero, empieza a tener inundaciones.

Por otro lado, para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años, las secciones de los pasos hidráulicos # 5 y # 6, presentan una capacidad insuficiente para transportar el caudal que se genera en un evento de precipitación máxima. En otras palabras, estas zonas se inundan para periodos de retorno de 25 y 50 y 100 años.

Por último, con las cotas de elevaciones del nivel del agua del modelo hidráulico con un evento de precipitación de 100 años, se confeccionaron las manchas de inundación en las

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

márgenes de la Quebrada Valverde. Estas manchas se presentan en mapas de susceptibilidad a amenazas debido a inundaciones urbanas.

Se propusieron soluciones y medidas para disminuir las probabilidades de inundación para la Quebrada Valverde. Además, se estudiaron diferentes soluciones posibles y se identificó cuáles funcionan para el caso de la cuenca de la Quebrada Valverde.

Las zonas inundables que se obtuvieron de los resultados del análisis hidráulico de la Quebrada Valverde, coinciden con las zonas que históricamente se han inundado en la cuenca de la Quebrada Valverde. No obstante, también indican que se inunda una zona en la cual no se registran inundaciones.

La zona del Raicero (secciones del paso # 4) ha sufrido inundaciones que han sido documentadas por la Municipalidad de Grecia, como se muestra en la Figura 5 y Figura 6. Esta zona también es indicada como de peligro de inundación por el modelo hidráulico. Con esto se verifica que el análisis de frecuencia, análisis hidrológico y análisis hidráulico, están dando resultados que se asemejan a la realidad.

Por otra parte, se analizaron las posibles soluciones y medidas para evitar las inundaciones en la Quebrada Valverde y se presentaron las posibilidades de manejo de inundaciones que se pueden implementar en la cuenca de la Quebrada Valverde, tomando en cuenta las características y necesidades de la cuenca. Es importante mencionar que este estudio, es un punto de partida, para la generación de un plan integral de manejo de la cuenca de la Quebrada Valverde, direccionado a salvaguardar la vida de los ciudadanos del cantón de Grecia. El gobierno local tiene en este trabajo, una herramienta que le permite iniciar un plan de integral de manejo de la cuenca.

Se determinó que las soluciones estructurales no son adecuadas para la Quebrada Valverde y se desestima su uso como solución para disminuir la vulnerabilidad antes inundaciones. Por otro lado, se eligen las soluciones no estructurales para la disminución de la vulnerabilidad ante inundaciones.

## **9.2. Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos en el análisis de frecuencia, análisis hidrológico y análisis hidráulico, se propone incluir las medidas no estructurales que se indican en este estudio en el plan regulador del canton de Grecia y velar porque estas directrices se cumplan. Las soluciones en orden de prioridad son las siguientes:

- Políticas de protección del cauce de la Quebrada Valverde
- Políticas de ordenamiento territorial
- Instrumentación de la cuenca de la Quebrada Valverde.

## **Capítulo 10. Referencias bibliográficas**

Alfaro Jiménez, D. (2013). *Análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Agres para el control de inundaciones*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Araya Mora, A. (2000). Análisis hidrológico e hidráulico del sistema de un sistema de evacuación de aguas pluviales de una cuenca urbana. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Barnes, H. H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*, EEUU: USGS.

Barrantes, E. & Vargas, E. (1990). *Metodología para la priorización de medidas correctivas y soluciones para los problemas de inundación en áreas urbanas de Costa Rica*. Proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Brunner, G. W. (2010). *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, EEUU: US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center.

Echandi, E. (1981). Unidades volcánicas de la Vertiente Norte de la cuenca del río Virilla- Tesis de Licenciatura, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica.

Holdridge, L. R. (1947). Determination of World Plants Formations from Simple Climatic Data, University of Michigan: Science Vol, 105.

Hosking J. R. M. (1990). L-moments: analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics, Journal of the Royal Statistical Society, Serie B, Vol 52:105-124.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Instituto Tecnológico de Costa Rica, (2014). Atlas Digital de Costa Rica, Cartago: ITCR.

Interagency advisory committee on water data, (1982). Guidelines for determining flood flow frequency, Virginia: Office of Water Data Coordination.

Landwehr, JM, Matalas, N,C, Wallis, J,R, (1979). Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel parameters and quantiles, Water Resources Research, Vol, 15:1055-1064.

Oviedo, Esteban. (2007). Heredianos sufren por río que contaminaron por años, La Nación, 18.

Leaver Ibarra C. (2014). *Evaluación de la Capacidad de Transporte del Río para el Manejo de Escorrentía Urbana*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Montealegre Alfaro, A. (2015). *Estudio hidrológico e hidráulico de las inundaciones del valle de Coris, Cartag*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Ministerio del Medio Ambiente de España, (1998). *Restauración Hidrológico Forestal de cuencas y control de la erosión*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

Murillo, R. (1994). *Estudio de Intensidades de Lluvia en la Cuenca del Río Virilla, Proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil*, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Murillo Muñoz, R. (2013). *Análisis sobre el estudio hidrológico, para revisión del desfogue de aguas pluviales del Proyecto de Urbanización en Condominio Montezuma*. Costa Rica.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Mora, M. (1995). *Estudio Geológico de un Sector al Sureste de Grecia, Provincia de Alajuela, Costa Rica*, Universidad de Costa Rica: Escuela Centroamericana de Geología.

Serrano, A. (2013). *Análisis de ríos utilizando el modelo HEC-RAS, San José; Programa de Educación Continua, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.*

Serrano, A. (2013). *Curso de análisis de ríos utilizando el modelo HEC-RAS, San José: Universidad de Costa Rica.*

Rodríguez, S. (2007). *Efectos del estrés por sobrehumedecimiento del suelo en la dinámica del índice de área foliar en caña de azúcar*, La Habana, Cuba, Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas.

Pérez, C. (2010). *100 years later, revisiting a Paris flood*, The New York Times, 3.

Utkina, I (2011). *Los bosques son indispensables para un suministro de agua de calidad*. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura, de Oficina de Prensa, FAO (Roma)

Villalobos Herrera, R. (2014). *Análisis de recarga artificial en la cuenca del río Quebrada Seca*. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Zúñiga, L. & Arce, J. (1990). *Problemática de las inundaciones en Costa Rica, una propuesta de análisis*. Proyecto de graduación para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.



**APÉNDICE A. Valores para hietogramas del modelo hidrológico**

**Cuadro 17. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 2 años**

Periodo de Retorno T=2	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	14,64
20	7,69
30	29,17
40	11,13
50	1,74
60	3,55
70	1,87
80	0,66
90	0,83
100	0,80
110	0,55
120	0,41
130	0,38
140	0,37
150	0,12
160	0,38
170	0,54
180	0,09
190	0,09
Total	75,03

**Cuadro 18. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 5 años**

Periodo de Retorno T=5	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	18,37
20	9,65
30	36,61
40	13,96
50	2,19
60	4,46
70	2,35
80	0,83
90	1,05
100	1,01
110	0,69
120	0,51
130	0,48
140	0,46
150	0,15
160	0,48
170	0,68
180	0,11
190	0,11
Total	94,15

**Cuadro 19. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 10 años**

Periodo de Retorno T=10	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	21,41
20	11,25
30	42,67
40	16,28
50	2,55
60	5,19
70	2,73
80	0,97
90	1,22
100	1,18
110	0,80
120	0,59
130	0,56
140	0,54
150	0,18
160	0,56
170	0,79
180	0,13
190	0,13
Total	109,75

**Cuadro 20. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 15 años**

Periodo de Retorno T=15	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	23,37
20	12,28
30	46,57
40	17,76
50	2,78
60	5,67
70	2,98
80	1,06
90	1,33
100	1,28
110	0,88
120	0,65
130	0,61
140	0,59
150	0,19
160	0,61
170	0,86
180	0,14
190	0,14
Total	119,77

**Cuadro 21. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 20 años**

Periodo de Retorno T=20	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	24,85
20	13,06
30	49,52
40	18,89
50	2,96
60	6,03
70	3,17
80	1,12
90	1,42
100	1,37
110	0,93
120	0,69
130	0,65
140	0,63
150	0,20
160	0,65
170	0,92
180	0,15
190	0,15
Total	127,37

**Cuadro 22. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 25 años**

Periodo de Retorno T=25	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	26,06
20	13,69
30	51,94
40	19,81
50	3,10
60	6,32
70	3,33
80	1,18
90	1,49
100	1,43
110	0,98
120	0,72
130	0,68
140	0,66
150	0,21
160	0,68
170	0,96
180	0,16
190	0,16
Total	133,58

**Cuadro 23. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 50 años**

Periodo de Retorno T=50	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	30,21
20	15,87
30	60,19
40	22,96
50	3,59
60	7,33
70	3,86
80	1,37
90	1,72
100	1,66
110	1,13
120	0,84
130	0,79
140	0,76
150	0,25
160	0,79
170	1,12
180	0,19
190	0,19
Total	154,81

**Cuadro 24. Valores de hietogramas para un periodo de retorno de 50 años**

Periodo de Retorno T=100	
Tiempo transcurrido (minutos)	Precipitación (mm)
10	35,01
20	18,40
30	69,77
40	26,62
50	4,17
60	8,49
70	4,47
80	1,58
90	2,00
100	1,92
110	1,31
120	0,97
130	0,92
140	0,88
150	0,29
160	0,92
170	1,30
180	0,22
190	0,22
Total	179,45



**APÉNDICE B. Valores de los hidrogramas sintéticos del modelo hidrológico**

**Cuadro 25. Valores tabulados de hidrogramas sintéticos (1)**

Tiempo (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)							
	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 10 años	TR= 15 años	TR= 20 años	TR= 25 años	TR= 50 años	TR= 100 años
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,271	0,362	0,455	0,522	0,577	0,624	0,800	1,026
20	0,740	1,044	1,339	1,548	1,716	1,857	2,378	3,036
30	2,719	3,885	4,936	5,653	6,213	6,681	8,347	10,379
40	5,228	7,458	9,427	10,751	11,778	12,632	15,642	19,268
50	7,857	11,194	14,104	16,045	17,545	18,788	23,142	28,349
60	9,873	14,014	17,595	19,971	21,802	23,315	28,598	34,881
70	10,712	15,158	18,976	21,500	23,442	25,044	30,619	37,225
80	10,621	14,974	18,692	21,145	23,029	24,581	29,972	36,340
90	9,675	13,590	16,920	19,114	20,797	22,183	26,988	32,654
100	8,465	11,860	14,738	16,632	18,085	19,280	23,422	28,298
110	7,332	10,250	12,718	14,340	15,585	16,608	20,149	24,314
120	6,282	8,766	10,862	12,240	13,296	14,164	17,165	20,693
130	5,355	7,460	9,232	10,397	11,290	12,023	14,557	17,533
140	4,566	6,350	7,851	8,837	9,592	10,211	12,352	14,865
150	3,878	5,385	6,651	7,483	8,120	8,641	10,445	12,560
160	3,298	4,572	5,643	6,345	6,882	7,321	8,843	10,627
170	2,826	3,912	4,823	5,419	5,876	6,249	7,542	9,057
180	2,429	3,357	4,135	4,642	5,032	5,349	6,452	7,742
190	2,095	2,890	3,557	3,989	4,324	4,594	5,538	6,640
200	1,790	2,465	3,031	3,398	3,682	3,912	4,714	5,648
210	1,513	2,082	2,558	2,866	3,105	3,298	3,974	4,759
220	1,259	1,730	2,126	2,380	2,579	2,740	3,301	3,952
230	1,031	1,416	1,740	1,948	2,111	2,243	2,702	3,234
240	0,840	1,154	1,417	1,587	1,720	1,827	2,201	2,635
250	0,682	0,937	1,151	1,288	1,396	1,483	1,787	2,139
260	0,554	0,760	0,934	1,046	1,133	1,204	1,451	1,736
270	0,449	0,617	0,758	0,849	0,920	0,977	1,177	1,409
280	0,365	0,501	0,616	0,689	0,747	0,793	0,956	1,144

**Cuadro 26. Valores tabulados de hidrogramas sintéticos (2)**

Tiempo (m)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)							
	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 10 años	TR= 15 años	TR= 20 años	TR= 25 años	TR= 50 años	TR= 100 años
290	0,296	0,407	0,500	0,559	0,606	0,644	0,776	0,929
300	0,240	0,330	0,406	0,454	0,492	0,523	0,630	0,754
310	0,195	0,268	0,329	0,369	0,399	0,424	0,511	0,612
320	0,158	0,218	0,267	0,299	0,324	0,344	0,415	0,497
330	0,129	0,177	0,217	0,243	0,263	0,280	0,337	0,403
340	0,104	0,143	0,176	0,197	0,214	0,227	0,273	0,327
350	0,085	0,116	0,143	0,160	0,173	0,184	0,222	0,266
360	0,068	0,094	0,115	0,129	0,140	0,148	0,179	0,214
370	0,054	0,074	0,091	0,102	0,110	0,117	0,140	0,168
380	0,040	0,055	0,067	0,075	0,081	0,086	0,103	0,122
390	0,025	0,034	0,042	0,046	0,050	0,053	0,063	0,074
400	0,018	0,024	0,029	0,032	0,034	0,036	0,043	0,051
410	0,013	0,018	0,022	0,024	0,026	0,027	0,033	0,038
420	0,010	0,013	0,016	0,017	0,019	0,020	0,023	0,028
430	0,007	0,010	0,012	0,013	0,014	0,015	0,018	0,021
440	0,006	0,007	0,009	0,010	0,011	0,011	0,014	0,016
450	0,004	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009	0,010	0,012
460	0,003	0,004	0,005	0,006	0,006	0,006	0,008	0,009
470	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,007
480	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,005
490	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004
500	0,003	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
510	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002
520	0,003	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
530	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
540	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
550	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
560	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

**APÉNDICE C. Perfiles y Tablas del modelo hidráulico en HEC-RAS**

En este apéndice se presentan los resultados obtenidos del modelo hidráulico mediante el programa computacional HEC-RAS. Los resultados se presentan en dos formatos: de manera tabulada, y en secciones transversales.

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

Debido a la cantidad de secciones transversales obtenidas, se muestran los resultados obtenidos para los eventos asociados a un periodo de retorno de 100 años.

**Cuadro 27. Resumen de cálculos del HEC-RAS para TR=100 años (1)**

<i>Sección</i>	<i>Caudal</i>	<i>Elevación mínima en sección</i>	<i>Elevación de la superficie de agua</i>	<i>Profundidad crítica</i>	<i>Elevación de gradiente energético</i>	<i>Pendiente de energía</i>	<i>Velocidad promedio</i>	<i>Área de flujo</i>	<i>Ancho superficial</i>	<i>Número de Froude</i>
	<i>(m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m/m)</i>	<i>(m/s)</i>	<i>(m<sup>2</sup>)</i>	<i>(m)</i>	<i>-</i>
Sección 1	37,22	895,91	897,76	897,76	898,19	0,013549	2,89	12,89	15,25	1
Paso 1 (1)	37,22	882,56	883,4	884	886,02	0,160462	7,17	5,19	10,29	3,22
Paso 1 (2)	37,22	881,7	882,64	883,16	884,1	0,084062	5,35	6,96	13,23	2,35
Paso 1 (3)	37,22	880,33	882,73	881,9	882,8	0,001102	1,11	33,67	25,99	0,31
Paso 1 (4)	37,22	880,9	882,64	881,58	882,77	0,00307	1,6	23,25	22,18	0,5
Sección 2	37,22	880,02	881,37	881,37	881,89	0,013138	3,17	11,74	11,67	1,01
Sección 3	37,22	877,45	878,84	879	879,52	0,019595	3,64	10,24	11,26	1,22
Sección 4	37,22	872,75	873,91	874,28	874,61	0,026135	3,71	10,04	13,66	1,38
Sección 5	37,22	862,74	864	864,67	866,02	0,076117	6,29	5,91	7,78	2,31
Sección 6	37,22	847,24	847,97	848,71	852,26	0,302871	9,17	4,06	8,92	4,34
Paso 2 (1)	37,22	847,9	849,5	849,29	849,73	0,006999	2,1	17,71	21,03	0,73
Paso 2 (2)	37,22	847,65	849,06	849,06	849,44	0,013572	2,72	13,69	18,24	1
Paso 2 (3)	37,22	846,88	848,09	848,43	849,14	0,035655	4,53	8,22	10,28	1,62
Paso 2 (4)	37,22	846,06	848,25	847,42	848,34	0,001978	1,3	28,53	26,87	0,4
Sección 7	37,22	845,95	847,08	847,08	847,46	0,014027	2,74	13,56	18,31	1,02

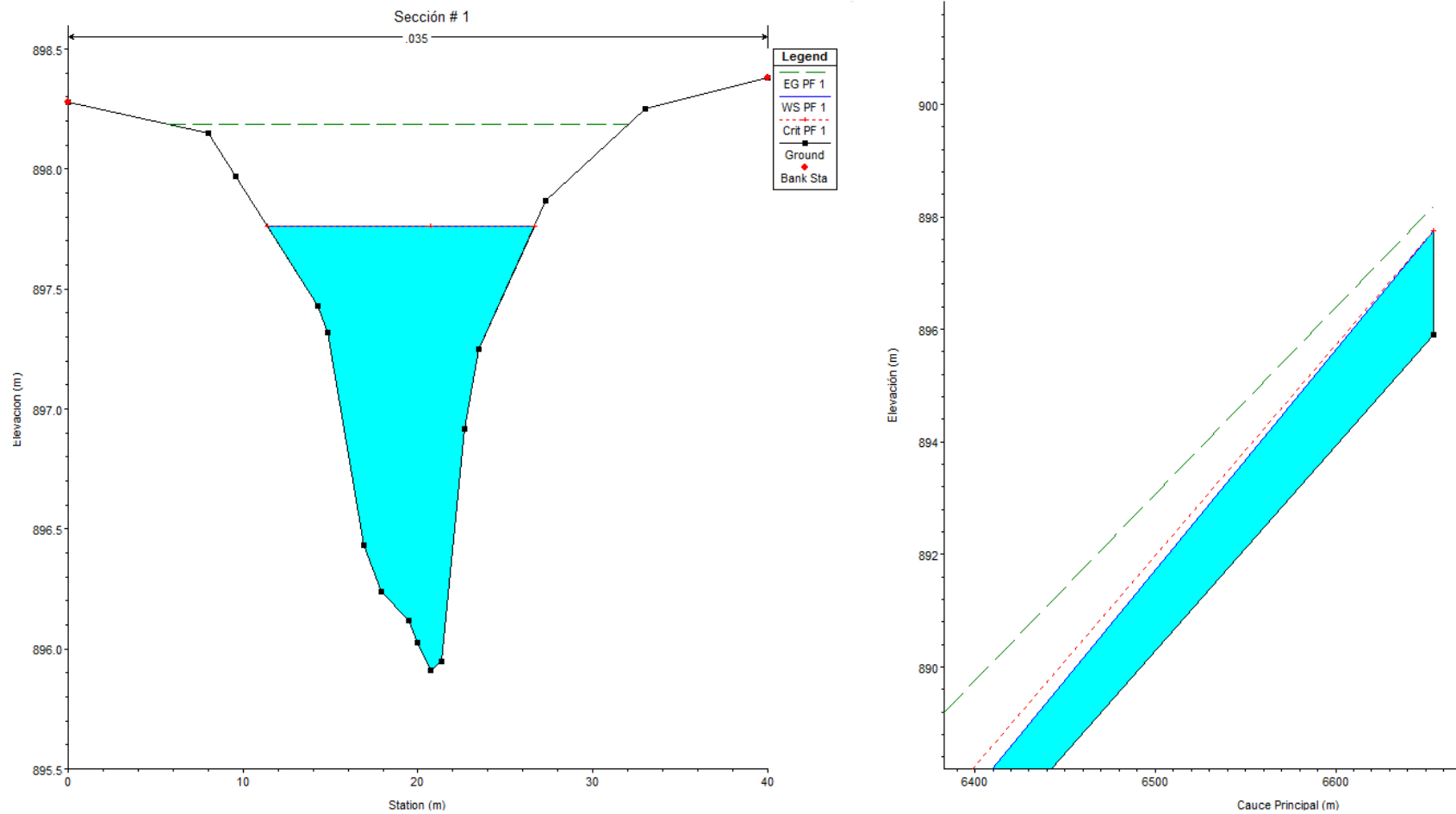
**Cuadro 28. Resumen de cálculos del HEC-RAS para TR=100 años (2)**

<i>Sección</i>	<i>Caudal</i>	<i>Elevación mínima en sección</i>	<i>Elevación de la superficie de agua</i>	<i>Profundidad crítica</i>	<i>Elevación de gradiente energético</i>	<i>Pendiente de energía</i>	<i>Velocidad promedio</i>	<i>Área de flujo</i>	<i>Ancho superficial</i>	<i>Número de Froude</i>
	<i>(m<sup>3</sup>/s)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m)</i>	<i>(m/m)</i>	<i>(m/s)</i>	<i>(m<sup>2</sup>)</i>	<i>(m)</i>	<i>-</i>
Sección 8	37,22	837,9	838,85	839,63	842,52	0,184414	8,49	4,39	7,27	3,49
Sección 9	37,22	837,91	839,45	839,45	839,81	0,014154	2,65	14,05	19,98	1,01
Paso 3 (1)	37,22	828,17	829,02	829,69	832,18	0,182168	7,86	4,73	8,9	3,44
Paso 3 (2)	37,22	827,65	829,18	829,33	829,97	0,019429	3,94	9,45	8,71	1,21
Paso 3 (3)	37,22	826,61	827,77	828,34	829,63	0,06148	6,04	6,16	7,09	2,07
Paso 3 (4)	37,22	826,52	828,31	828,32	828,96	0,013925	3,58	10,41	8,1	1,01
Sección 10	37,22	814,01	815,11	815,86	818,08	0,142407	7,63	4,88	7,7	3,06
Sección 11	37,22	794,31	795,71	795,84	796,4	0,01828	3,67	10,13	10,31	1,18
Sección 12	37,22	762,12	762,95	763,54	765,82	0,215245	7,49	4,97	11,5	3,64
Sección 13	37,22	758,94	760,39	760,4	760,89	0,013113	3,11	11,98	12,37	1,01
Paso 4 (1)	37,22	743,51	744,67	744,84	745,28	0,084927	3,46	10,74	39,63	2,12
Paso 4 (2)	37,22	743,08	744,56	744,51	744,74	0,01144	1,88	19,81	40	0,85
Paso 4 (3)	37,22	742,98	744,62		744,69	0,002463	1,18	31,58	40	0,42
Paso 4 (4)	37,22	742,88	744,31	744,31	744,53	0,016452	2,1	17,75	40	1
Paso 5 (1)	37,22	737,85	740,37	739,87	740,5	0,006885	1,61	23,17	40	0,67

**Cuadro 29. Resumen de cálculos del HEC-RAS para TR=100 años (2)**

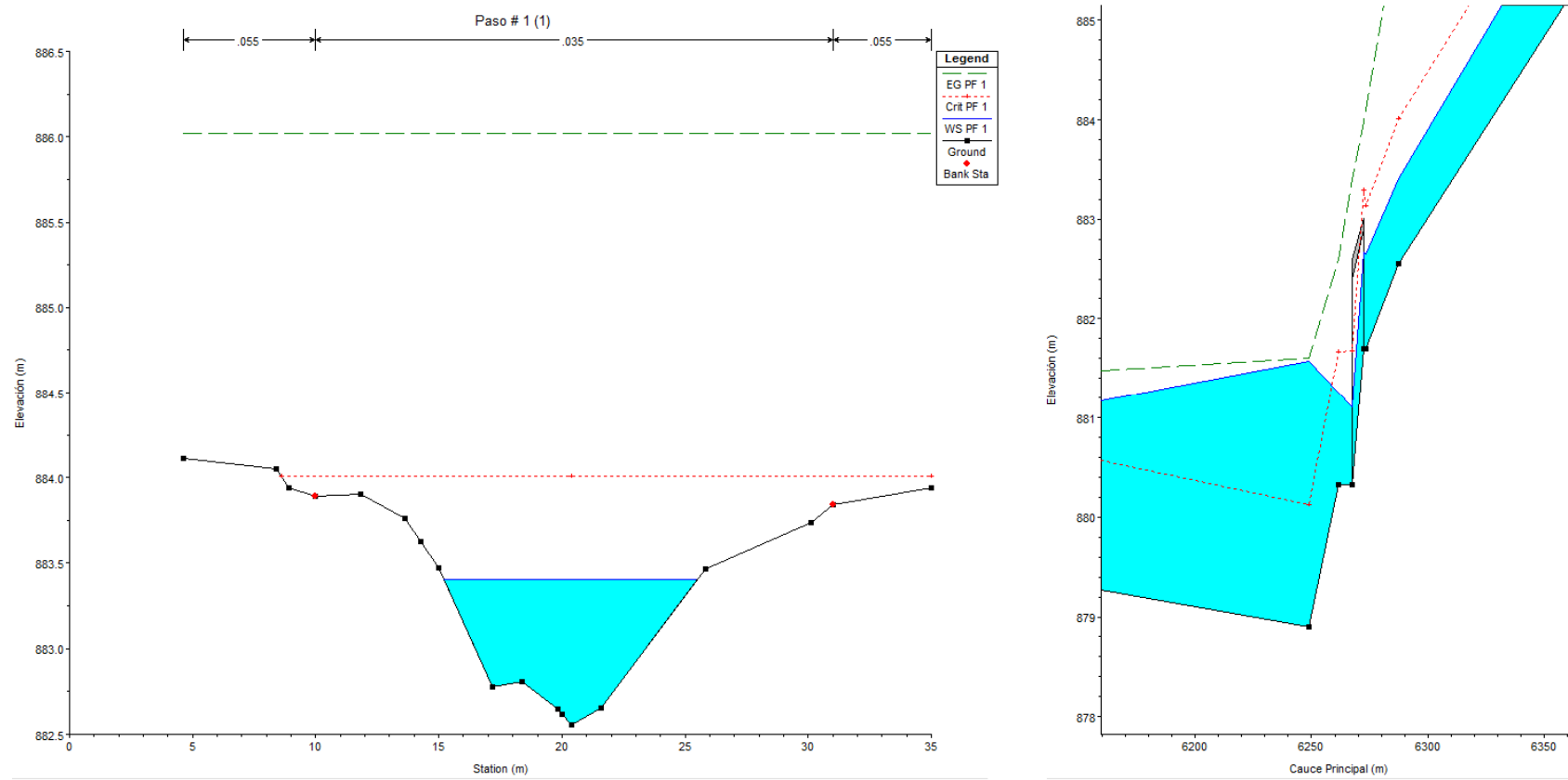
<b>Sección</b>	<b>Caudal</b>	<b>Elevación mínima en sección</b>	<b>Elevación de la superficie de agua</b>	<b>Profundidad crítica</b>	<b>Elevación de gradiente energético</b>	<b>Pendiente de energía</b>	<b>Velocidad promedio</b>	<b>Área de flujo</b>	<b>Ancho superficial</b>	<b>Número de Froude</b>
	<b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m)</b>	<b>(m/m)</b>	<b>(m/s)</b>	<b>(m<sup>2</sup>)</b>	<b>(m)</b>	<b>-</b>
Paso 5 (2)	37,22	737,8	739,93	739,93	740,27	0,013278	2,56	14,53	20,32	0,97
Paso 5 (3)	37,22	737,75	739,78	739,86	740,14	0,028734	2,65	14,03	33,32	1,31
Paso 5 (4)	37,22	737,54	739,53	739,53	739,74	0,016002	2,07	17,98	40	0,99
Paso 6 (1)	37,22	731,88	735,22	733,88	735,27	0,001173	1,04	35,8	31,21	0,31
Paso 6 (2)	37,22	732,76	734,97	734,97	735,21	0,018293	2,17	17,17	40	1,06
Paso 6 (3)	37,22	732,82	734,87	734,72	735	0,006306	1,57	23,65	40	0,65
Paso 6 (4)	37,22	732,93	734,64	734,64	734,86	0,015806	2,08	17,92	40	0,99
Paso 7 (1)	37,22	719,47	720,23	721,13	726,2	0,390234	10,82	3,44	7,05	4,95
Paso 7 (2)	37,22	719,64	720,96	721,44	722,51	0,059544	5,53	6,73	9,1	2,05
Paso 7 (3)	37,22	719,35	720,41	720,92	722,17	0,078273	5,89	6,32	9,71	2,33
Paso 7 (4)	37,22	719,27	720,98	720,98	721,51	0,013002	3,24	11,49	10,92	1,01
Paso 8 (1)	37,22	711,94	713,07	713,82	715,67	0,093334	7,15	5,21	6,25	2,5
Paso 8 (2)	37,22	711,86	714,22	713,7	714,47	0,005624	2,24	16,62	14,19	0,66
Paso 8 (3)	37,22	711,83	714,18	713,66	714,44	0,005469	2,23	16,72	14,11	0,65
Paso 8 (4)	37,22	711,72	713,63	713,63	714,24	0,013729	3,49	10,68	8,76	1,01
Paso 9 (1)	37,22	690,79	693,05	692,09	693,15	0,001769	1,44	25,86	18,79	0,39
Paso 9 (2)	37,22	691,42	692,73	692,73	693,05	0,013221	2,53	14,72	21,54	0,98
Paso 9 (3)	37,22	691,31	692,41	692,54	692,99	0,020998	3,36	11,07	14,84	1,24
Paso 9 (4)	37,22	690,48	691,47	691,73	692,3	0,036537	4,02	9,25	14,39	1,6
Sección 14	37,22	678,02	679,05	679,3	679,81	0,029969	3,87	9,62	13,65	1,47

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 54. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 1**

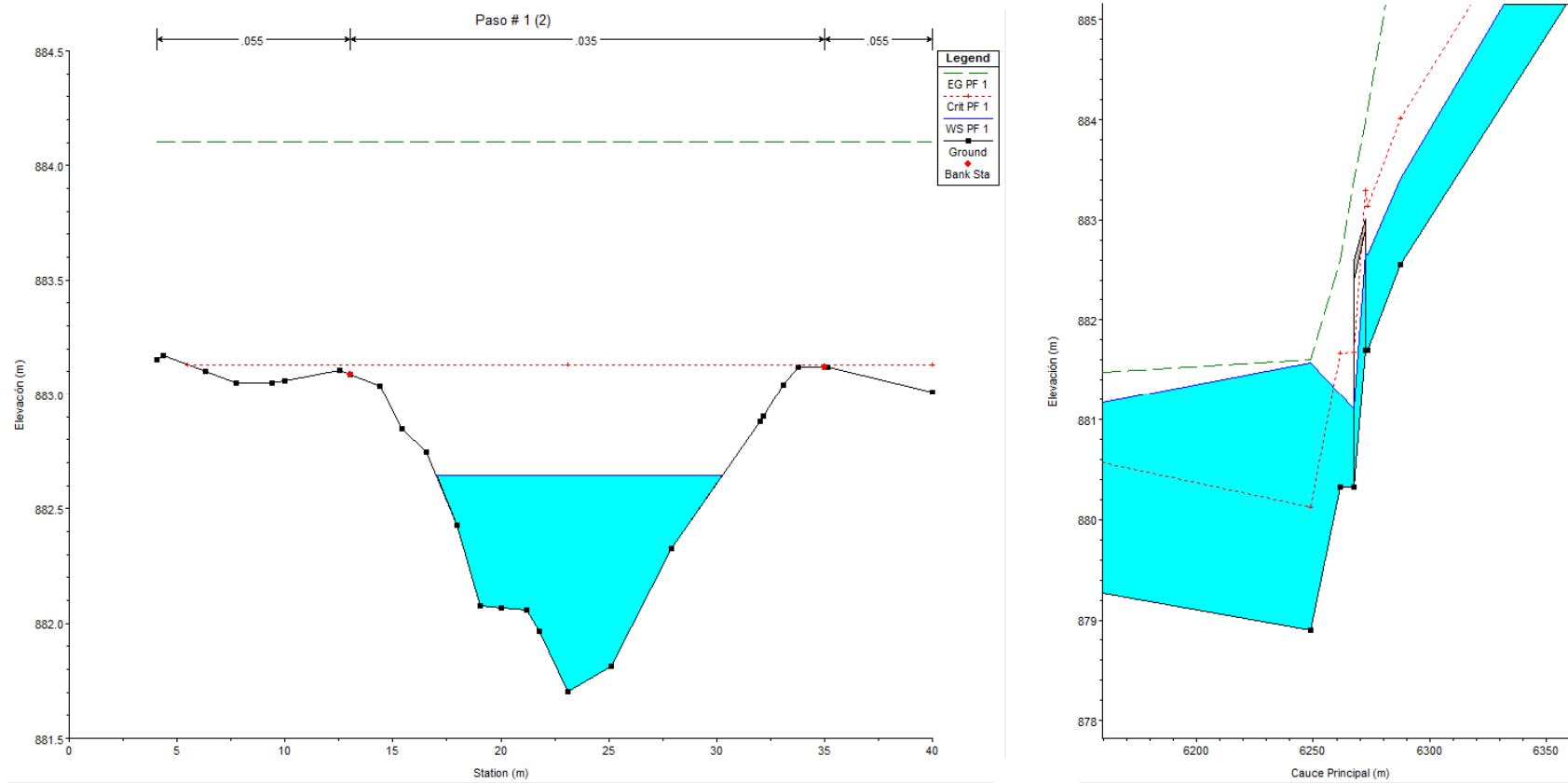
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 55. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (1)**

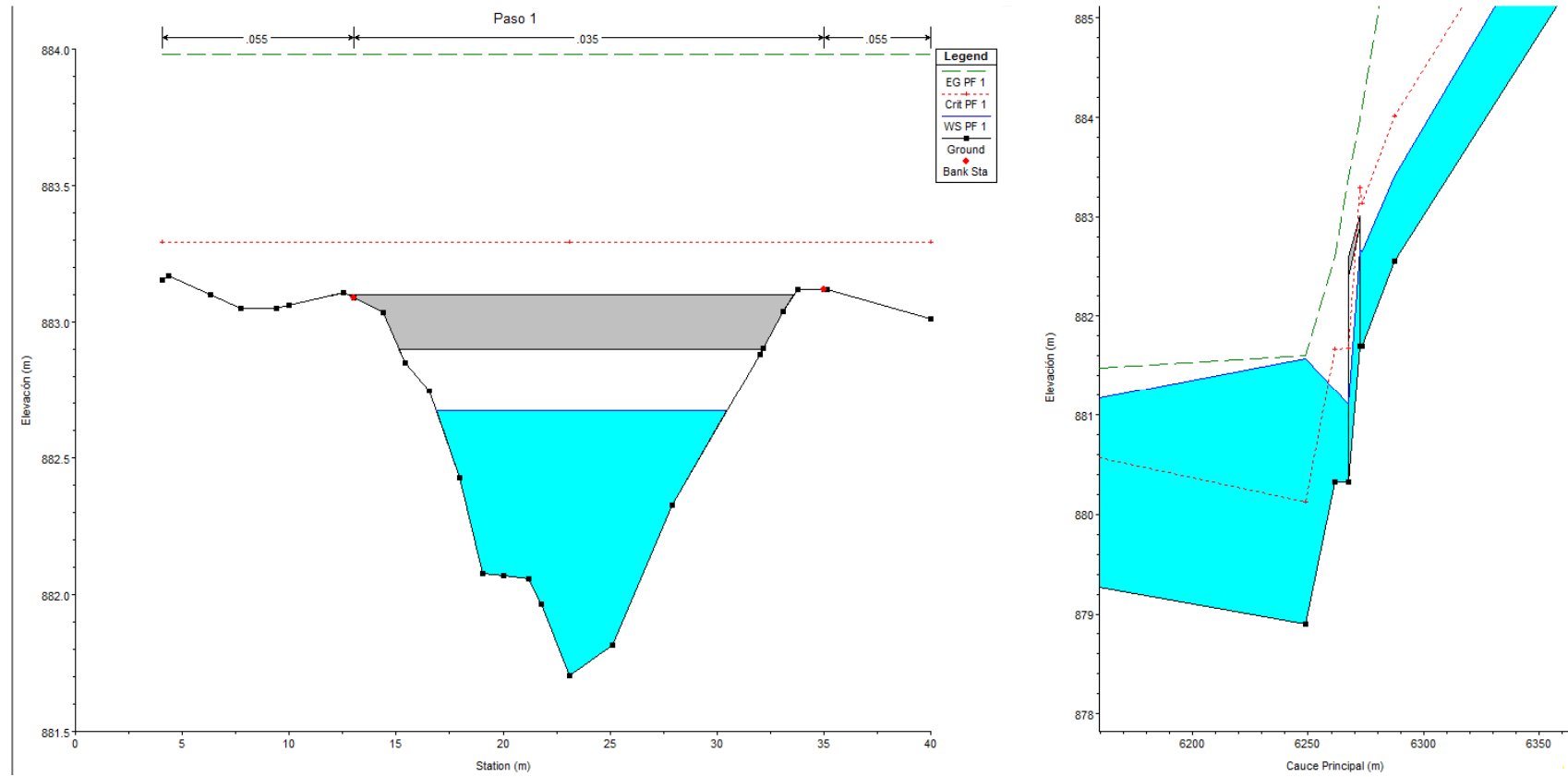


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



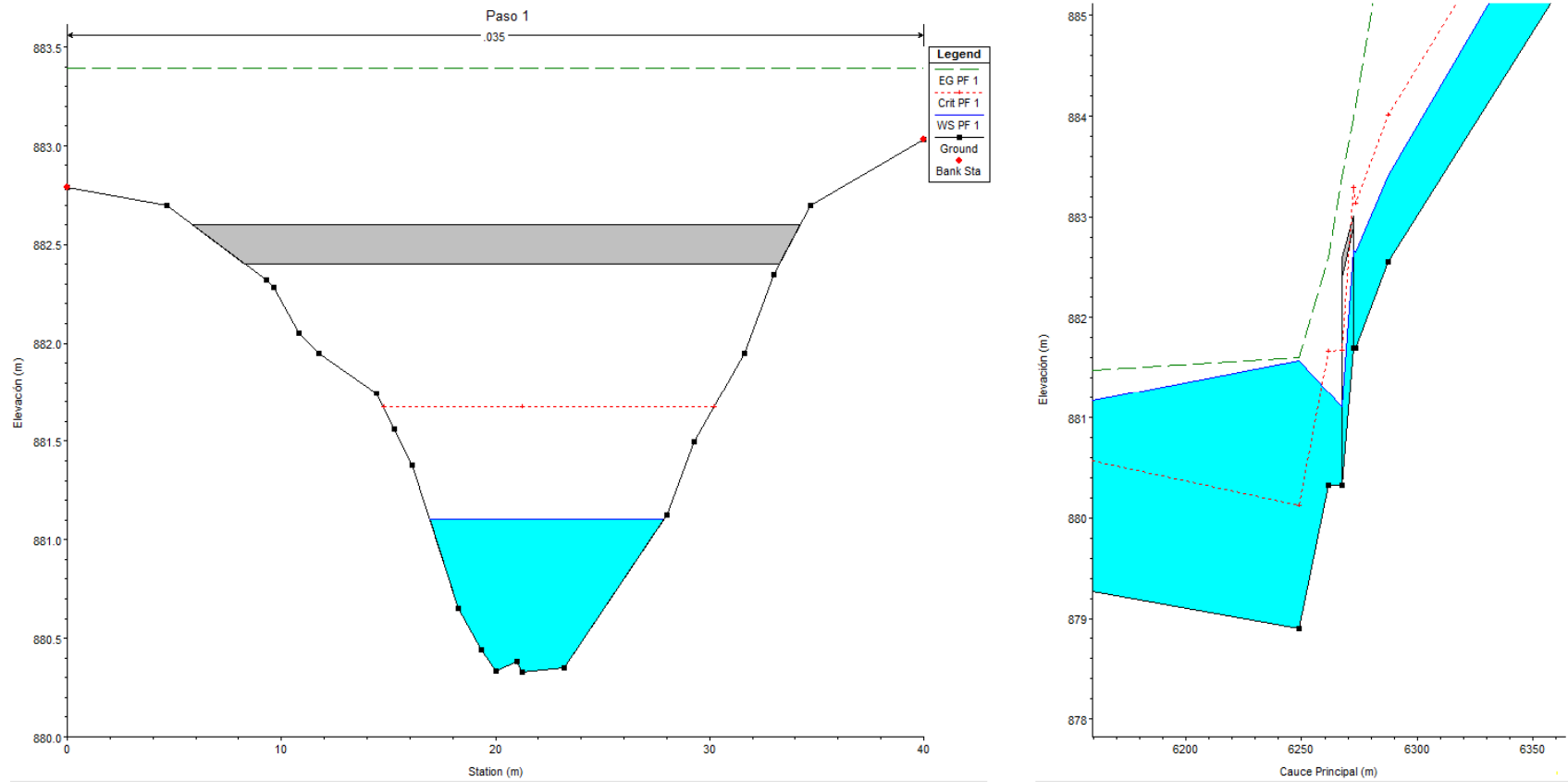
**Figura 56. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



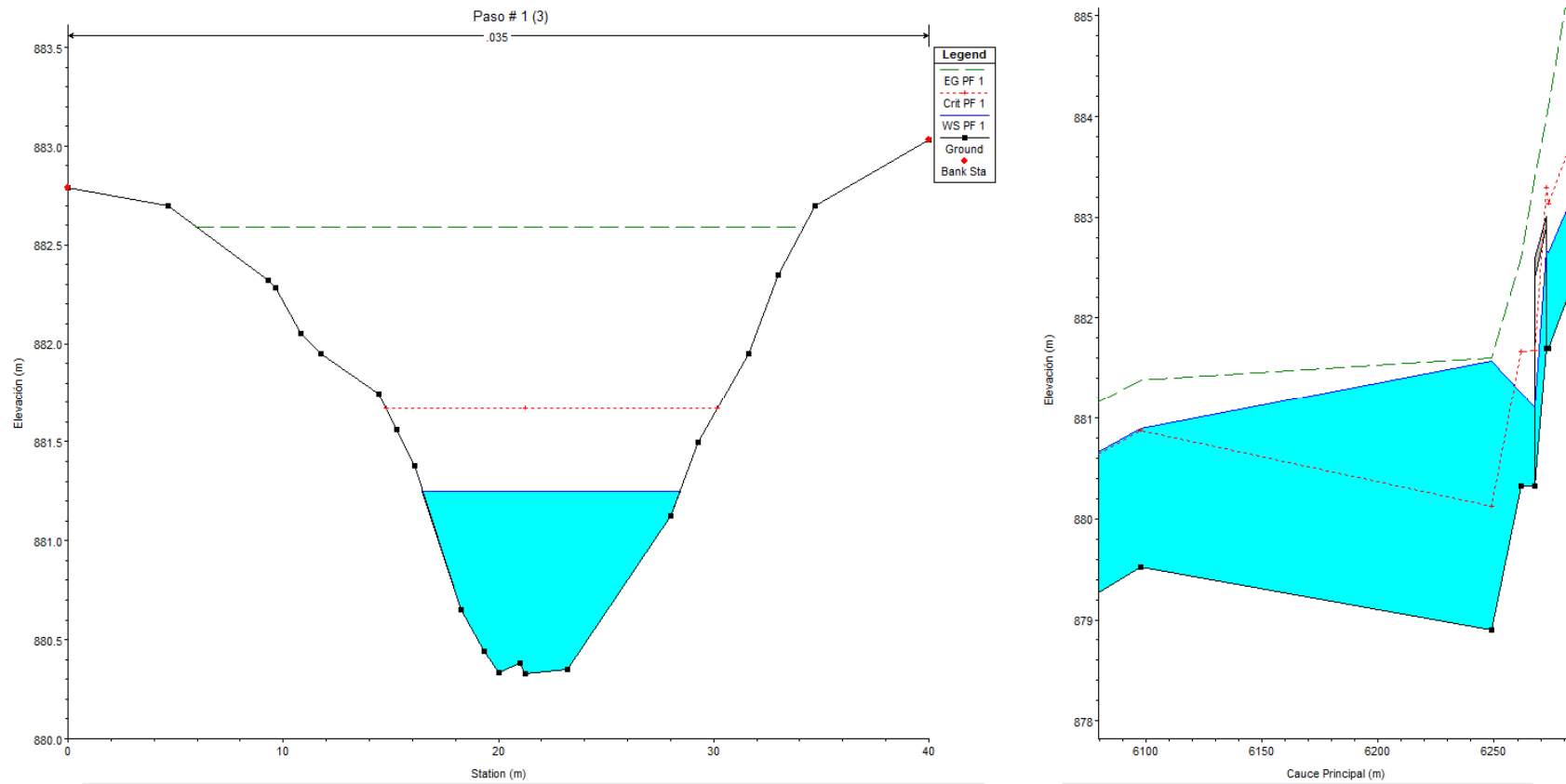
**Figura 57. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 1 (aguas arriba).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



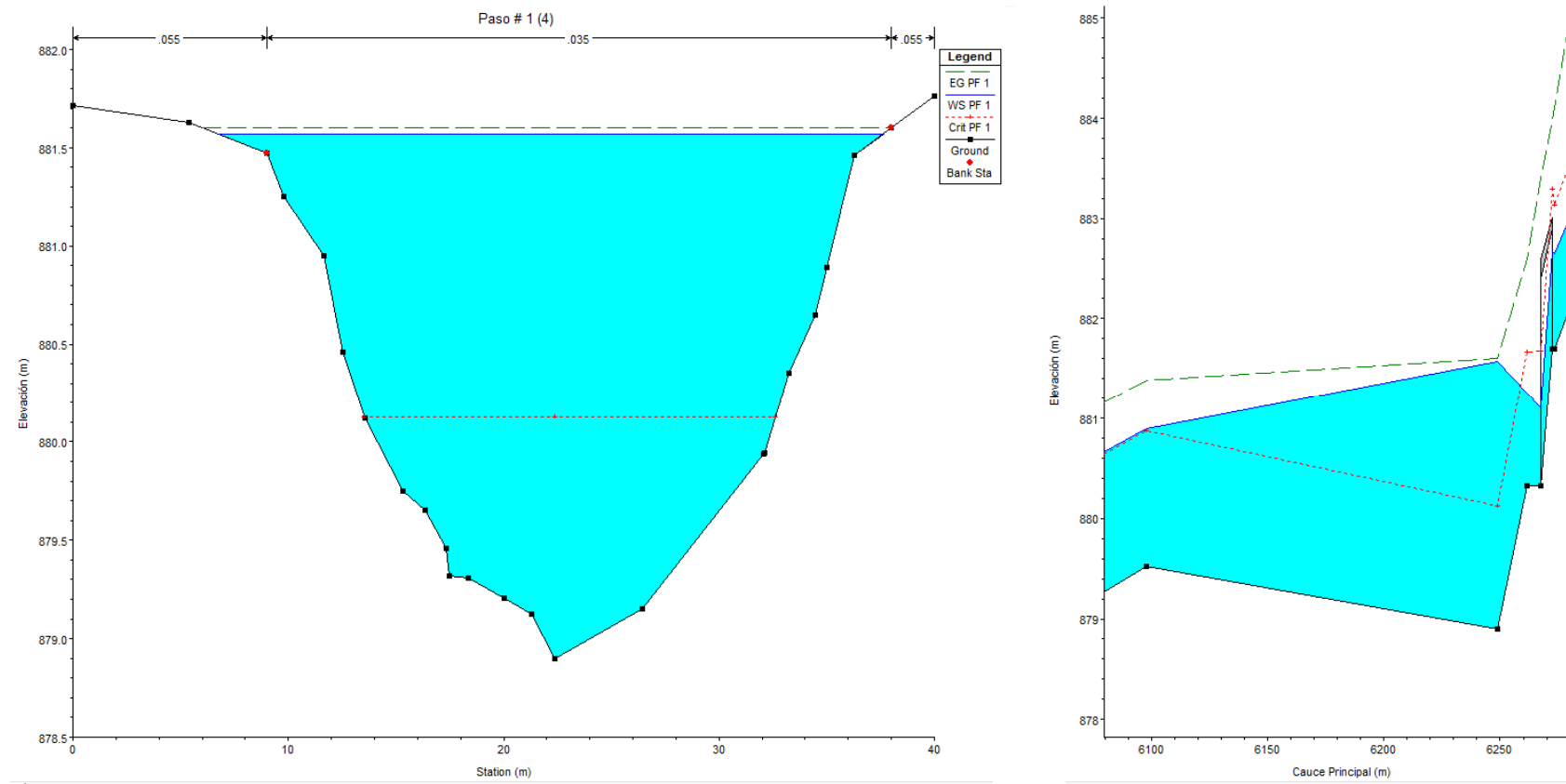
**Figura 58. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 1 (aguas abajo)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



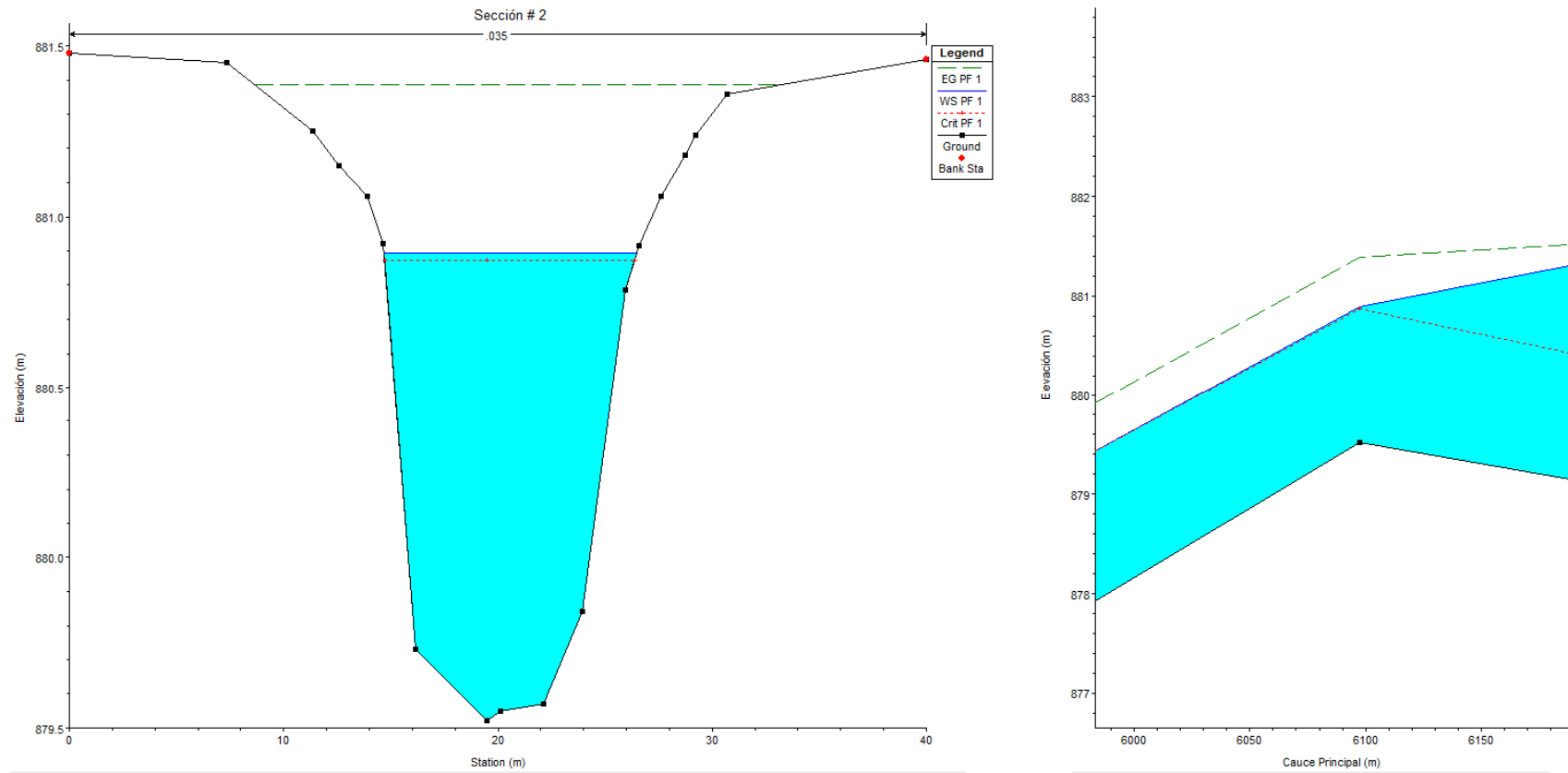
**Figura 59. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (3)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



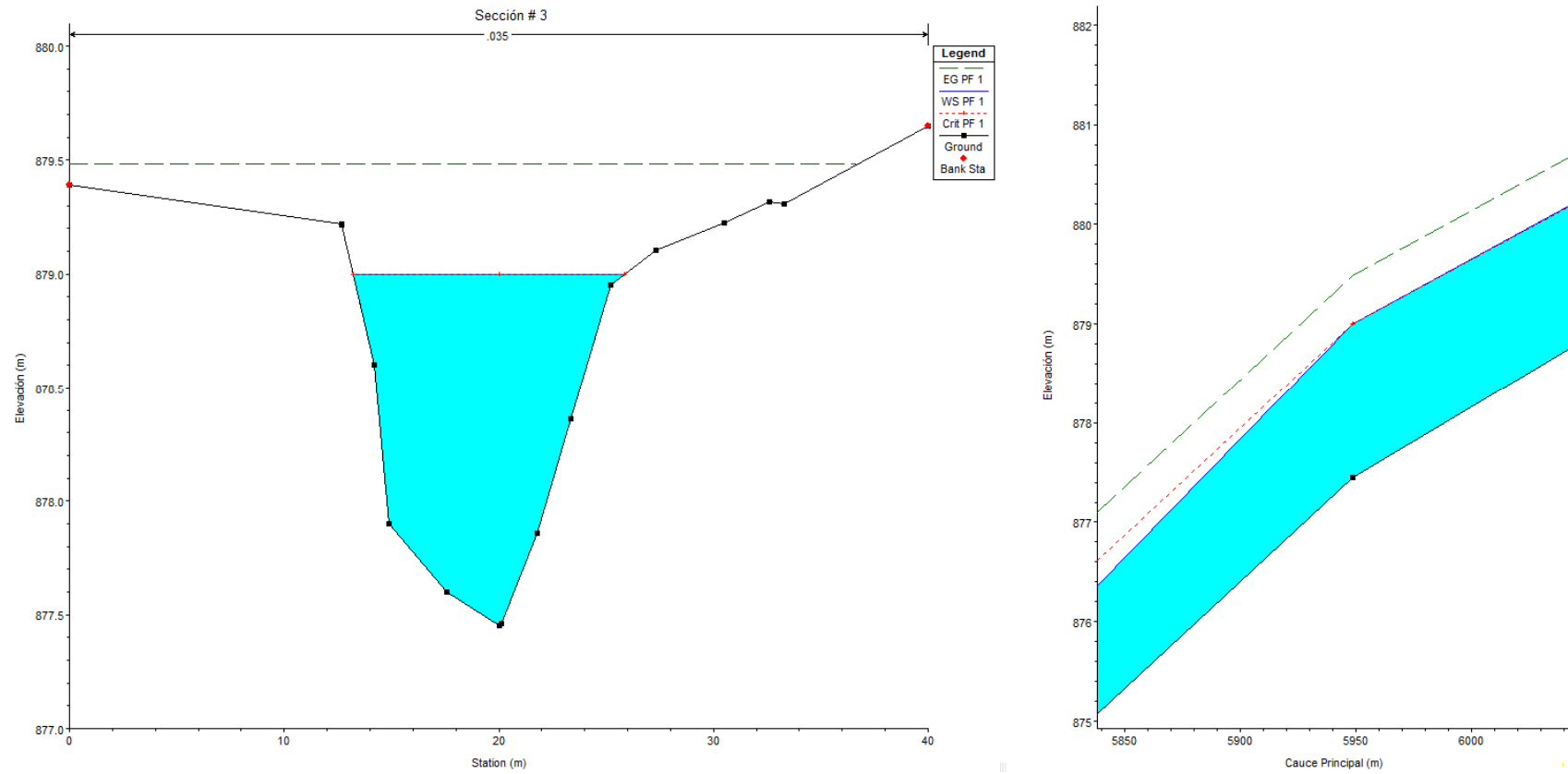
**Figura 60. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 1 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



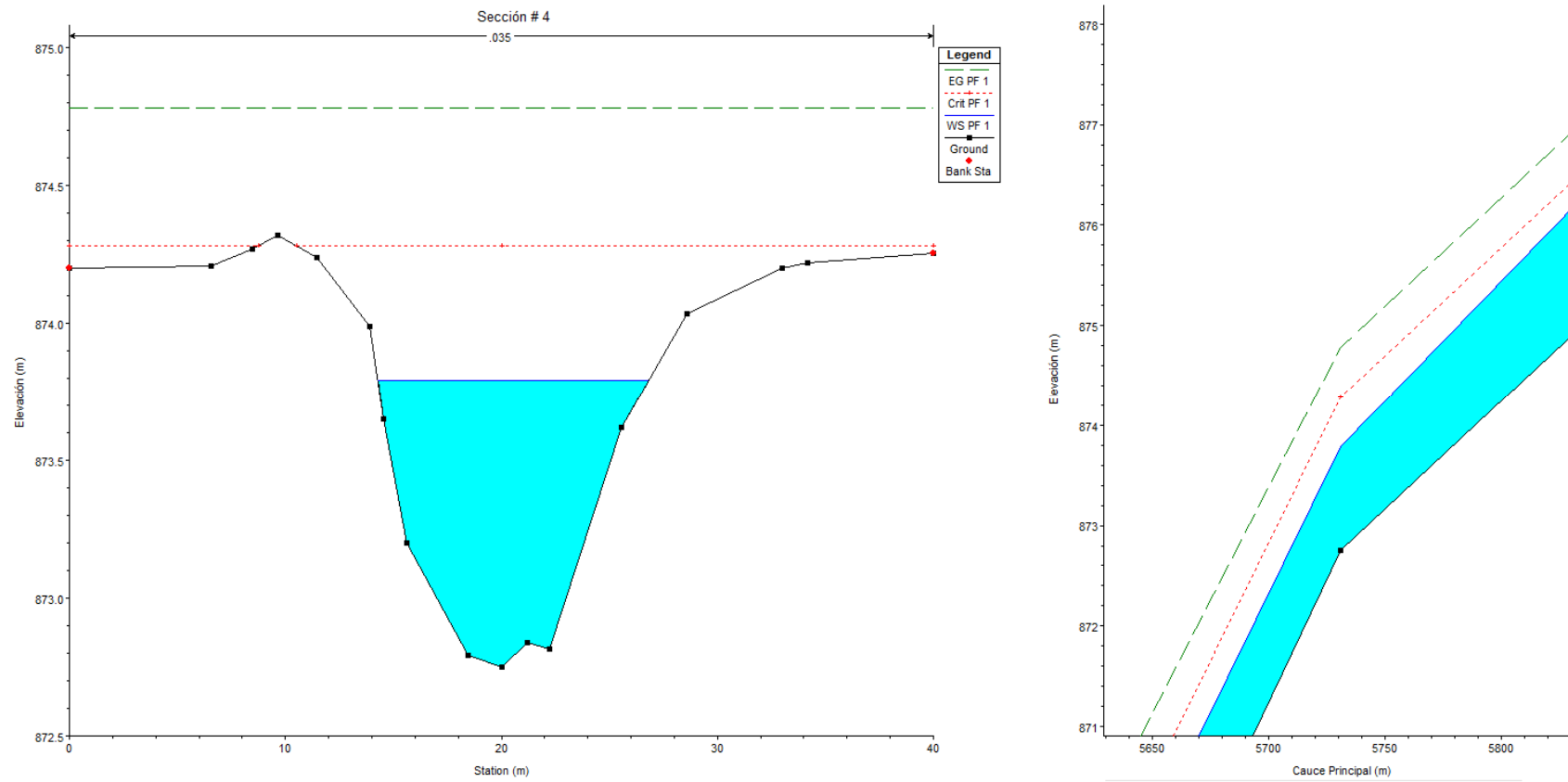
**Figura 61. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 2**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 62. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 3**

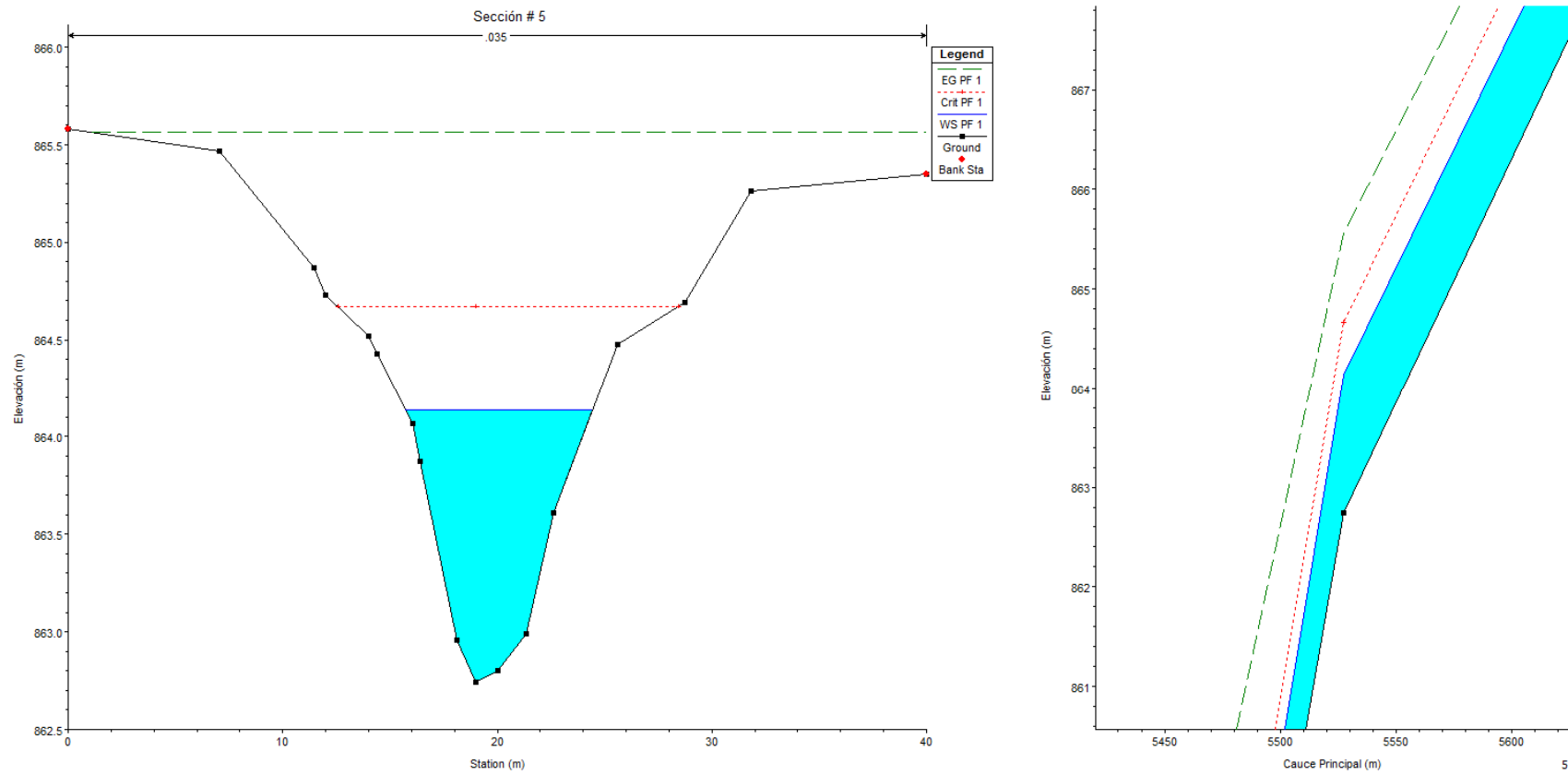
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 63. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 4**

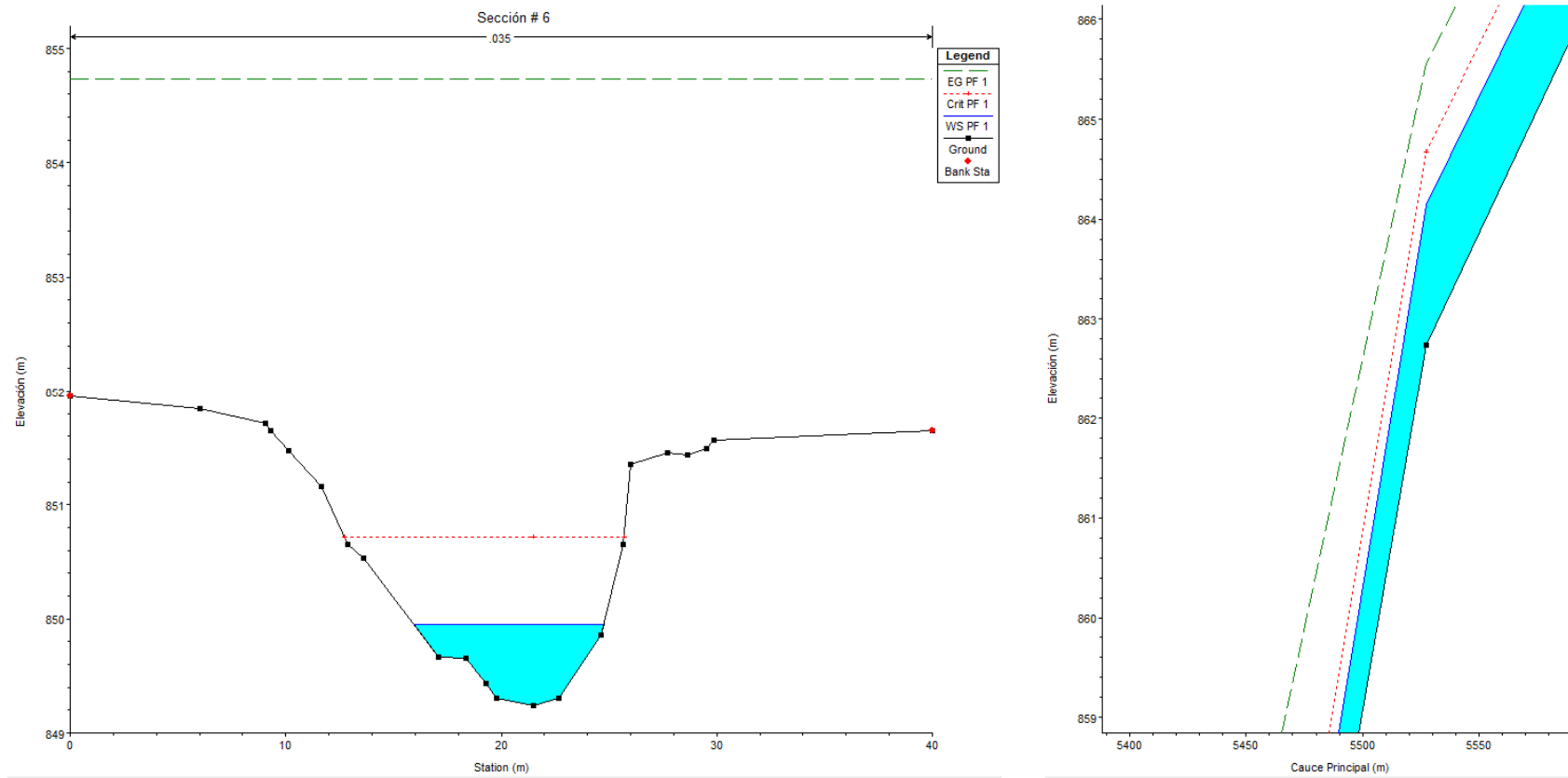


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



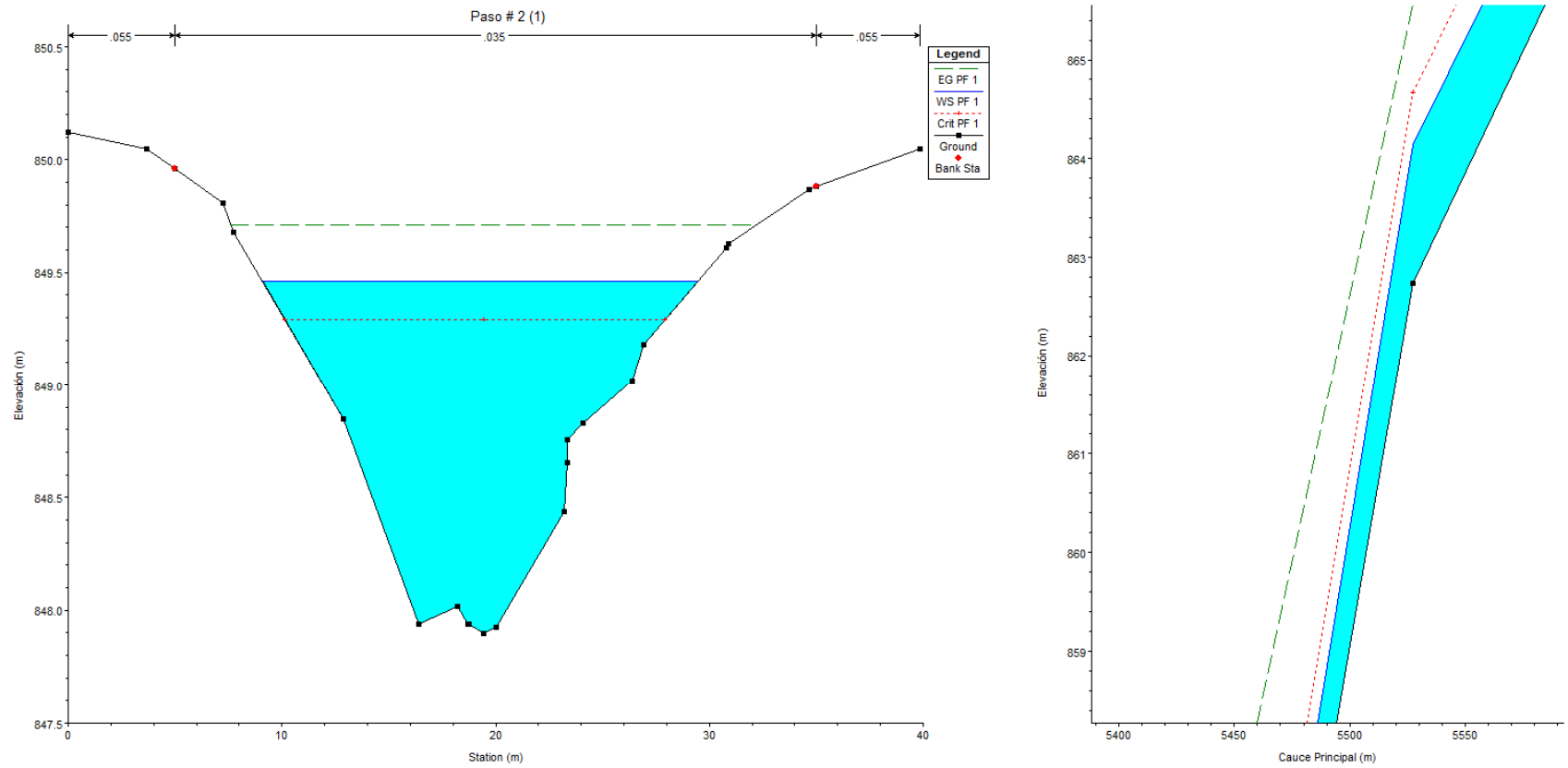
**Figura 64. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 5**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



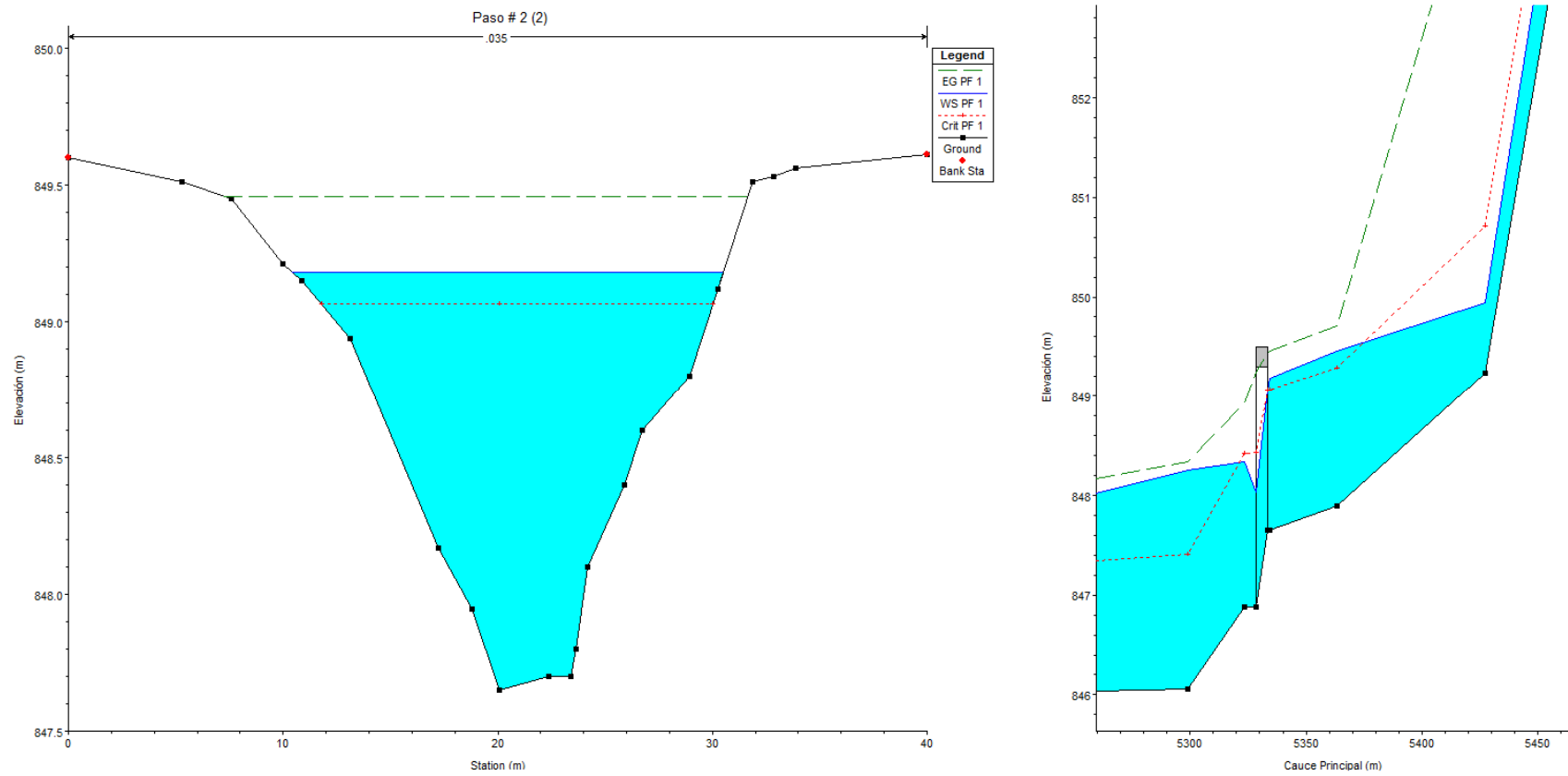
**Figura 65. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 6**

Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



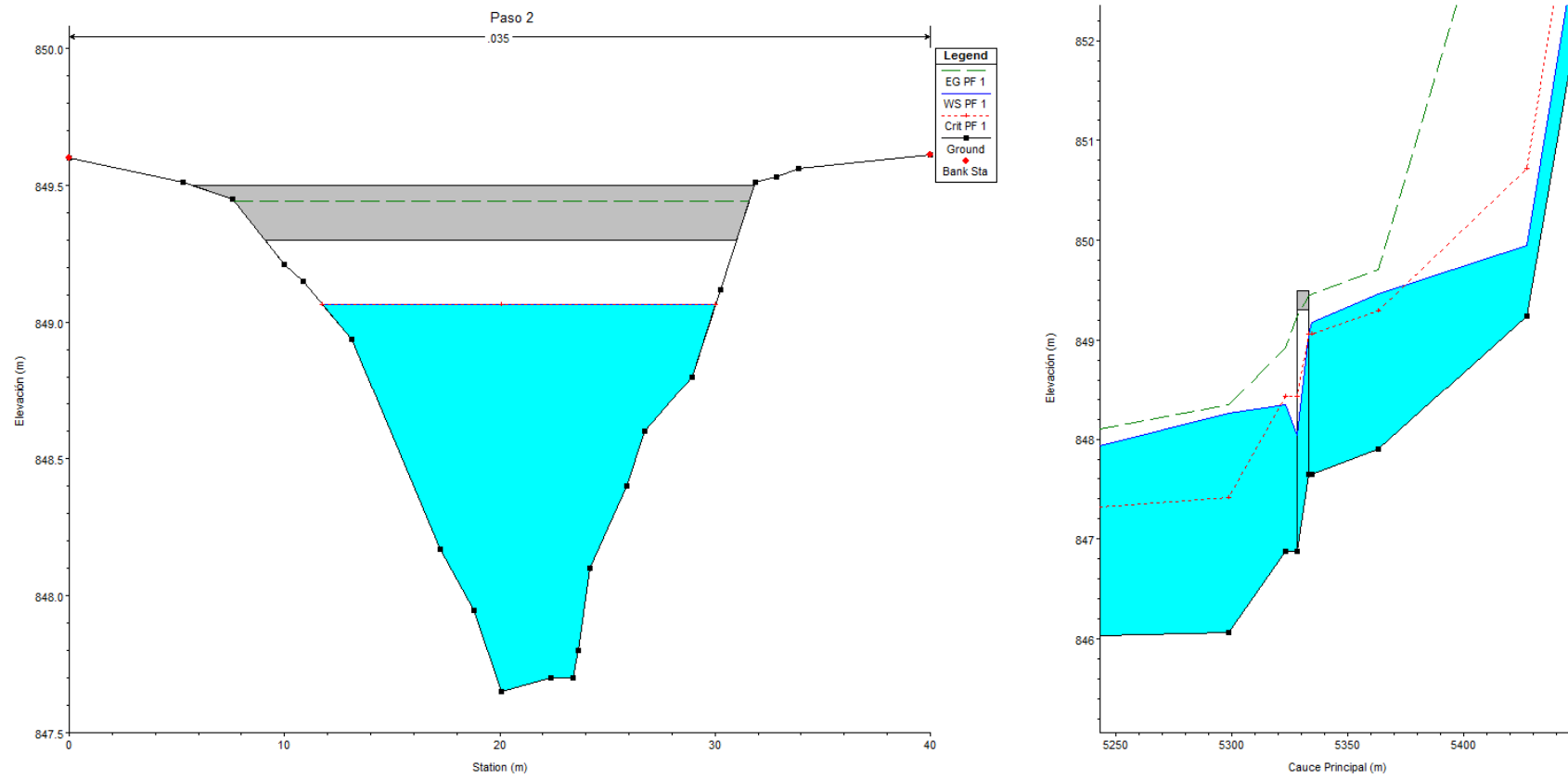
**Figura 66. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



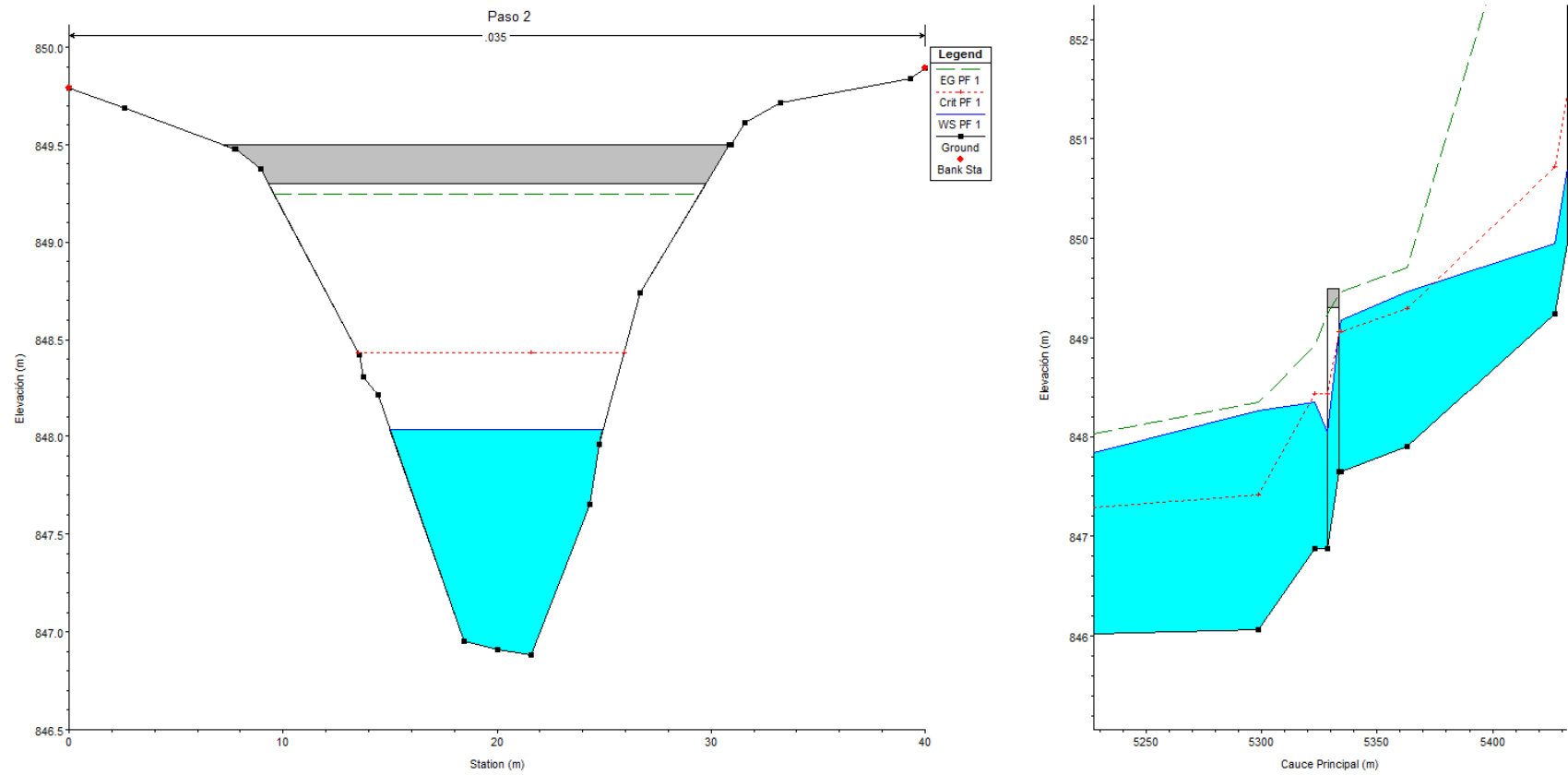
**Figura 67. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



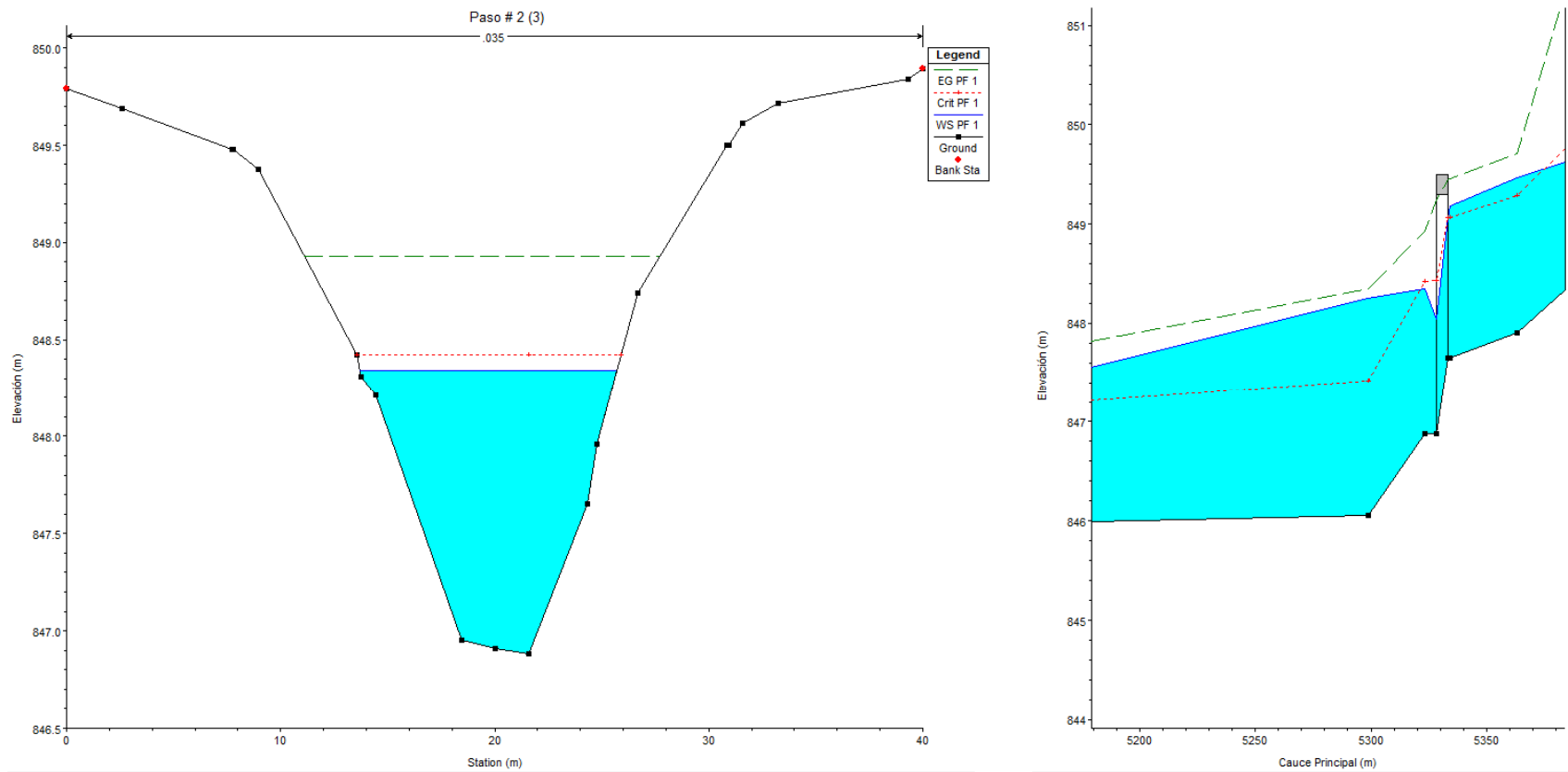
**Figura 68. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 2 (aguas arriba).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



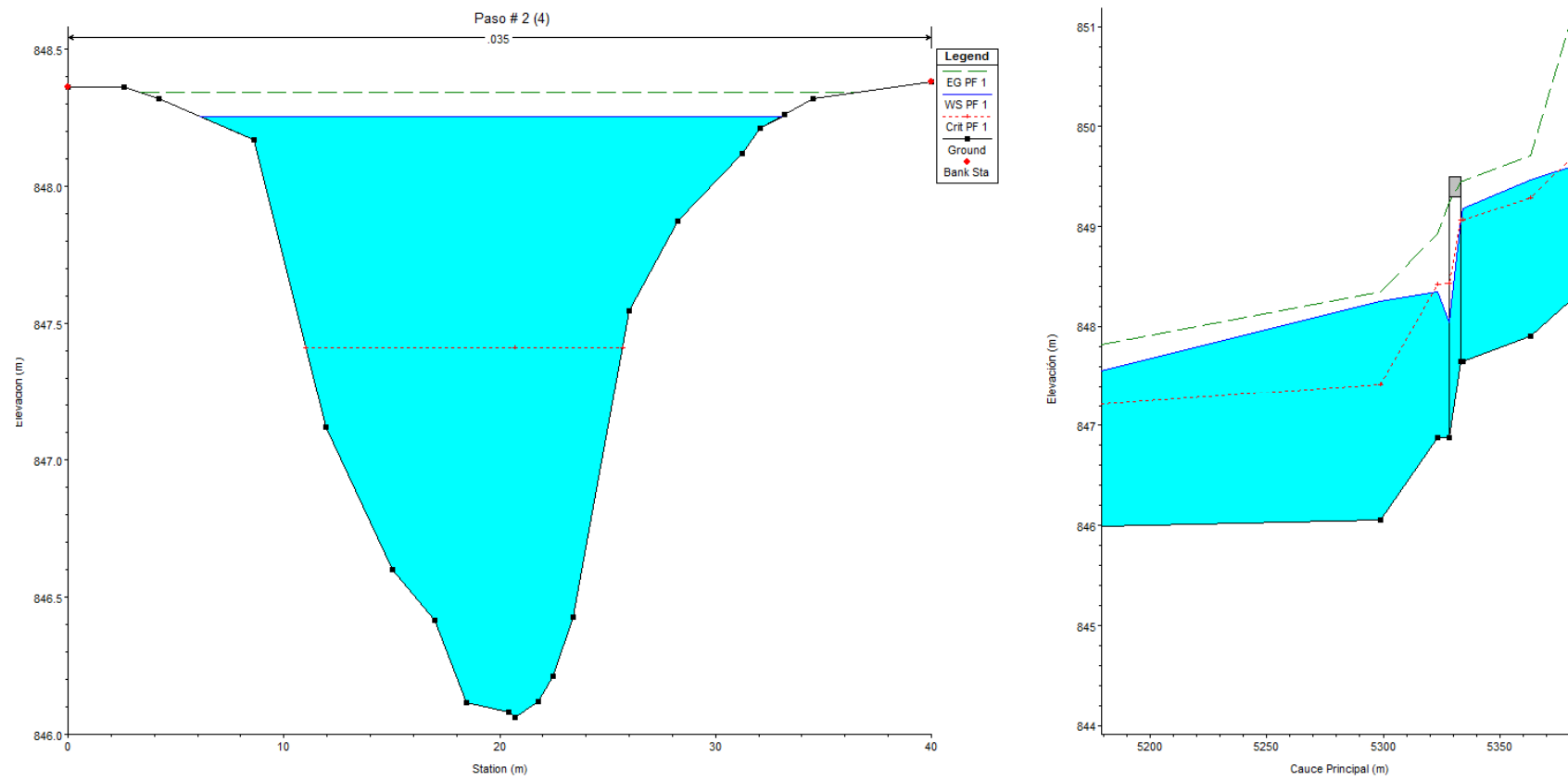
**Figura 69. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 2 (aguas abajo).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 70. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (3)**

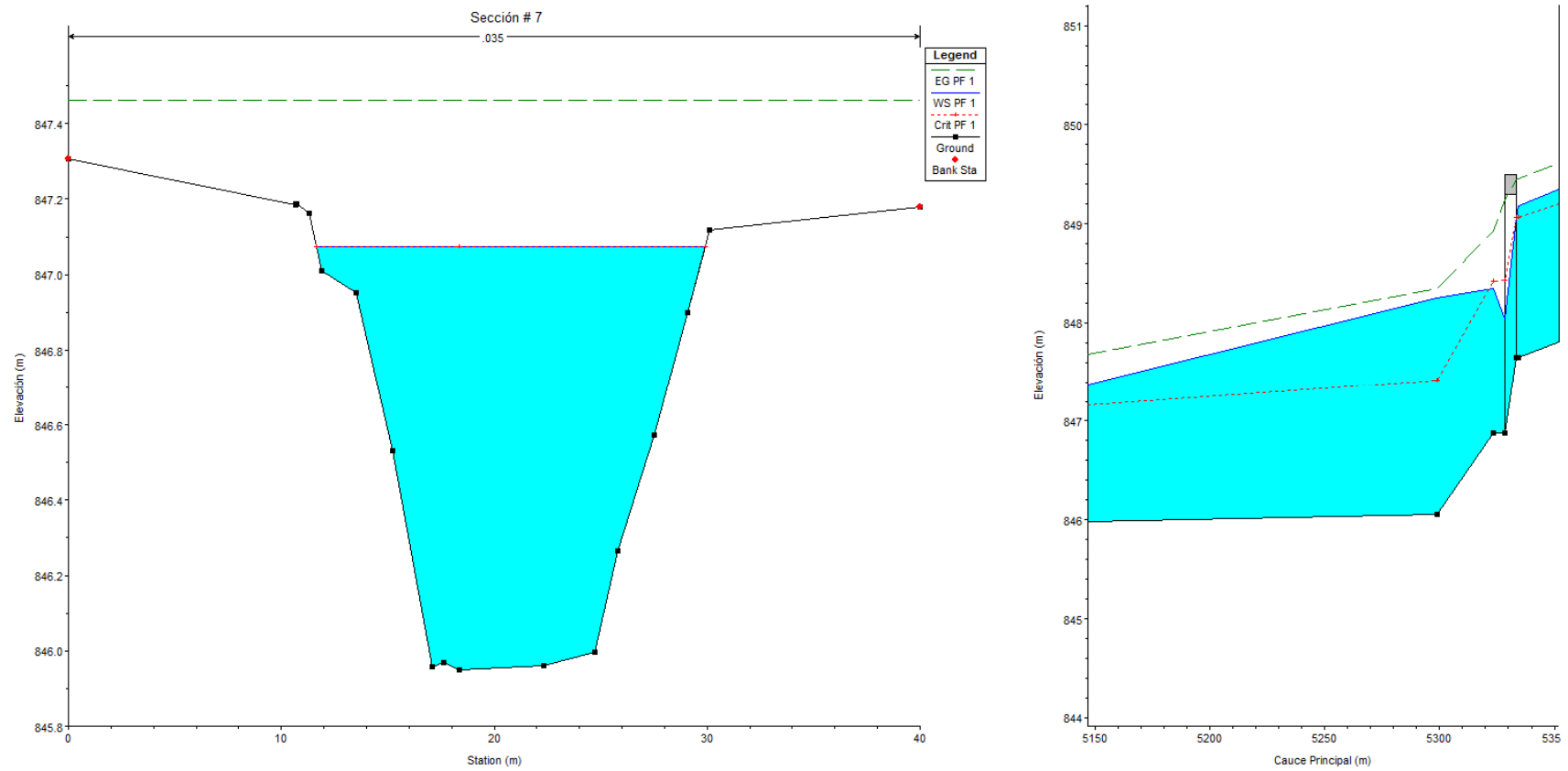
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 71. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 2 (4)**

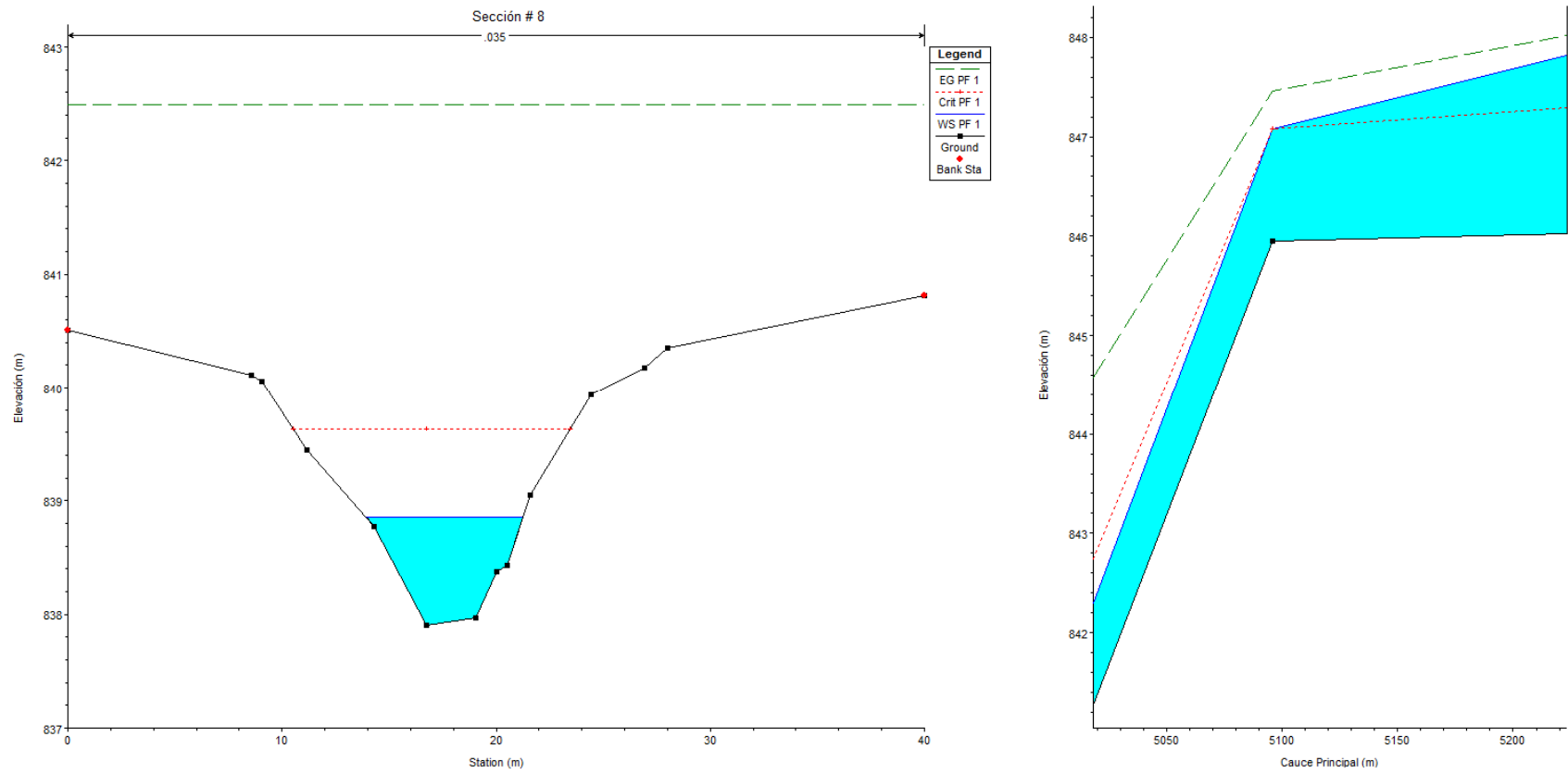


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



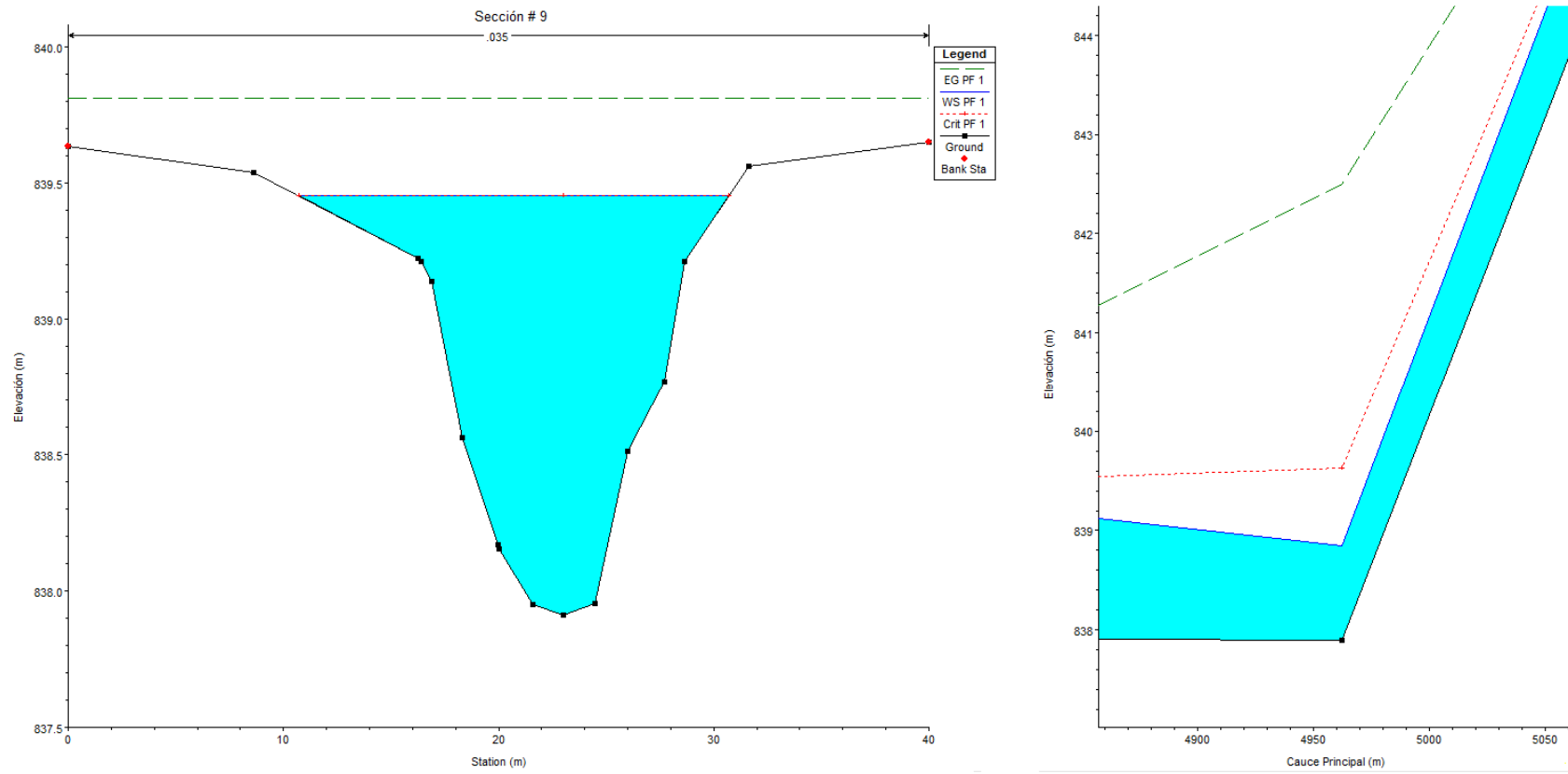
**Figura 72. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 7**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



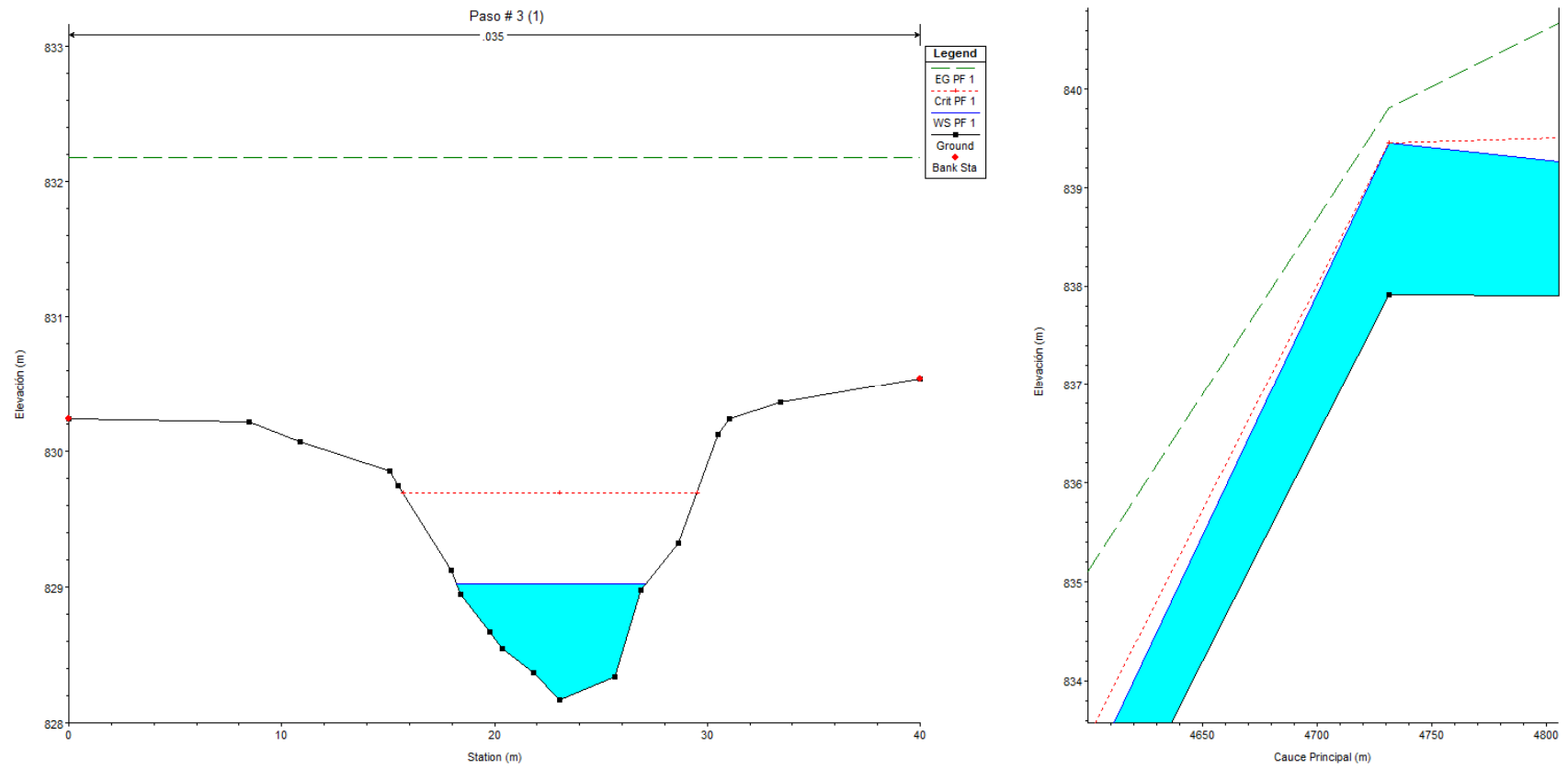
**Figura 73. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 8**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



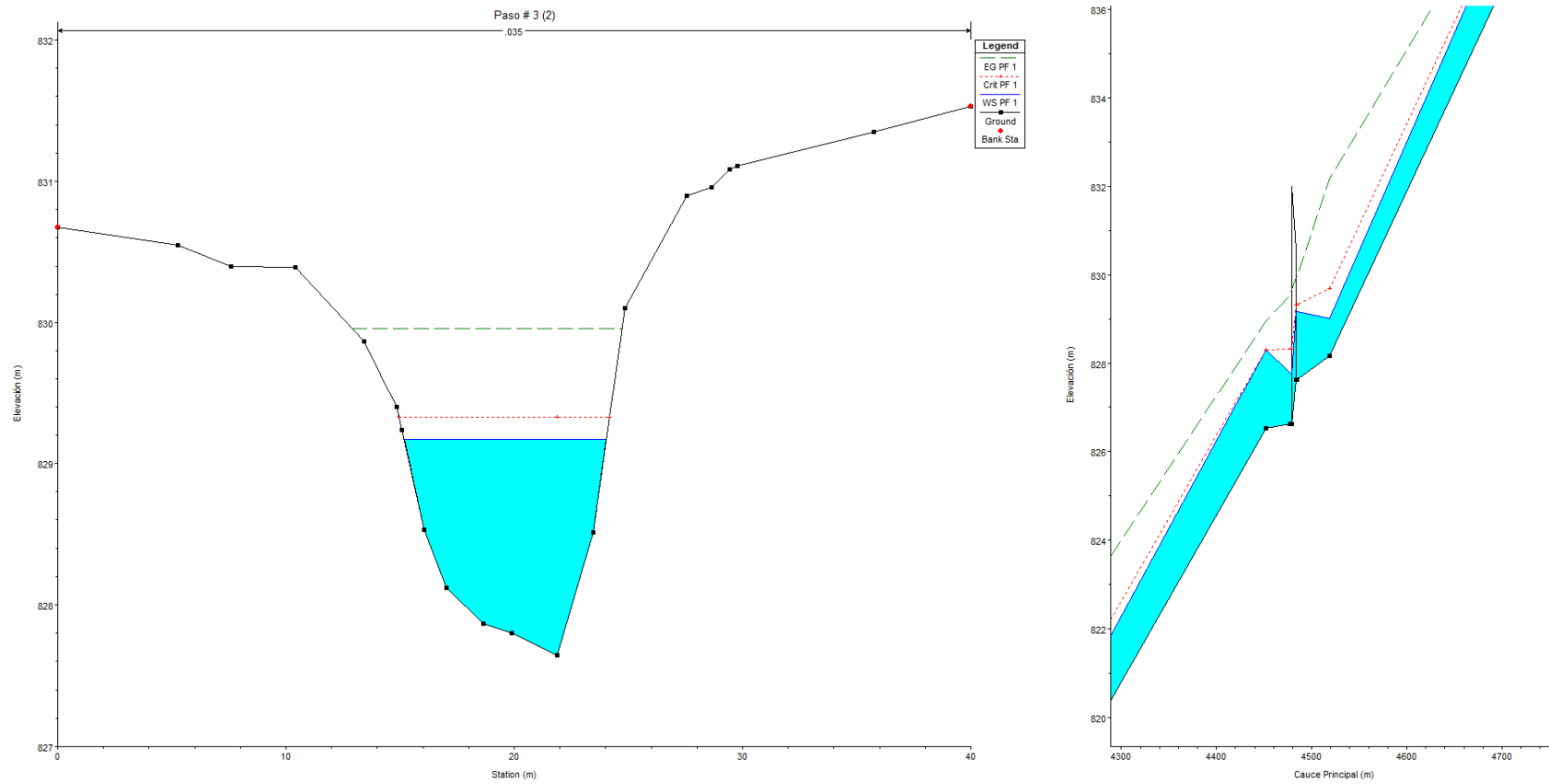
**Figura 74. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 9**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



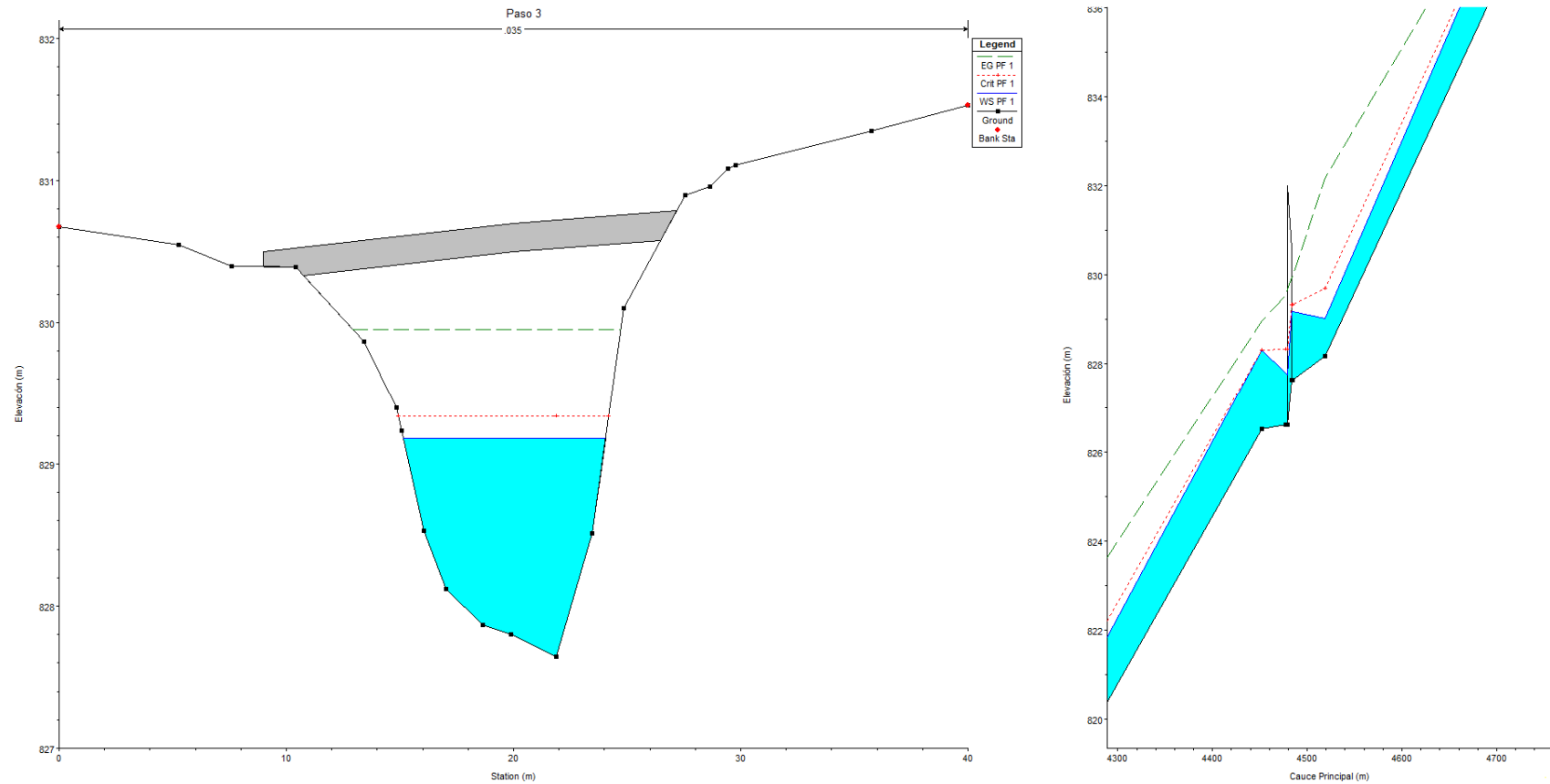
**Figura 75. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

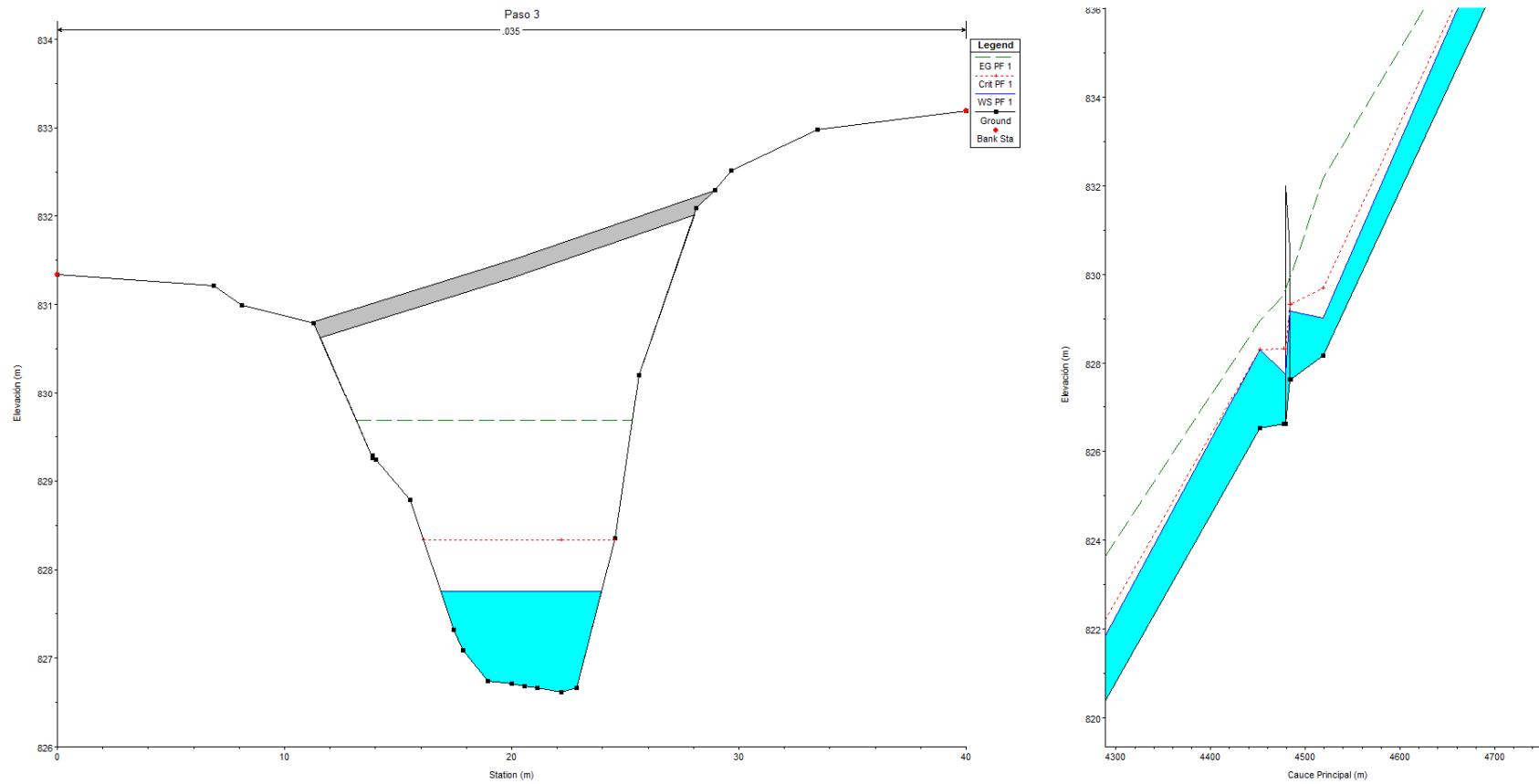


**Figura 76. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde

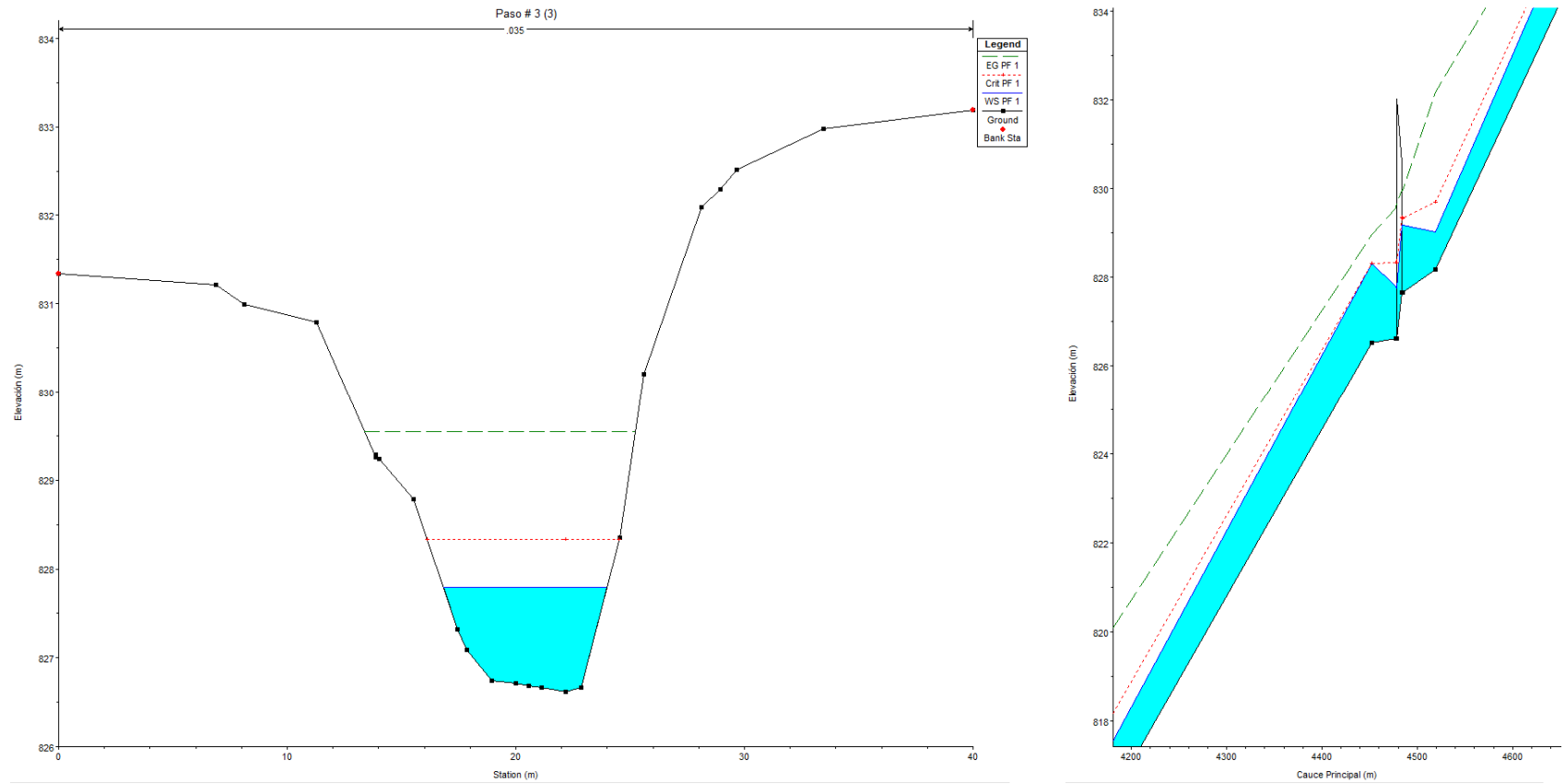


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



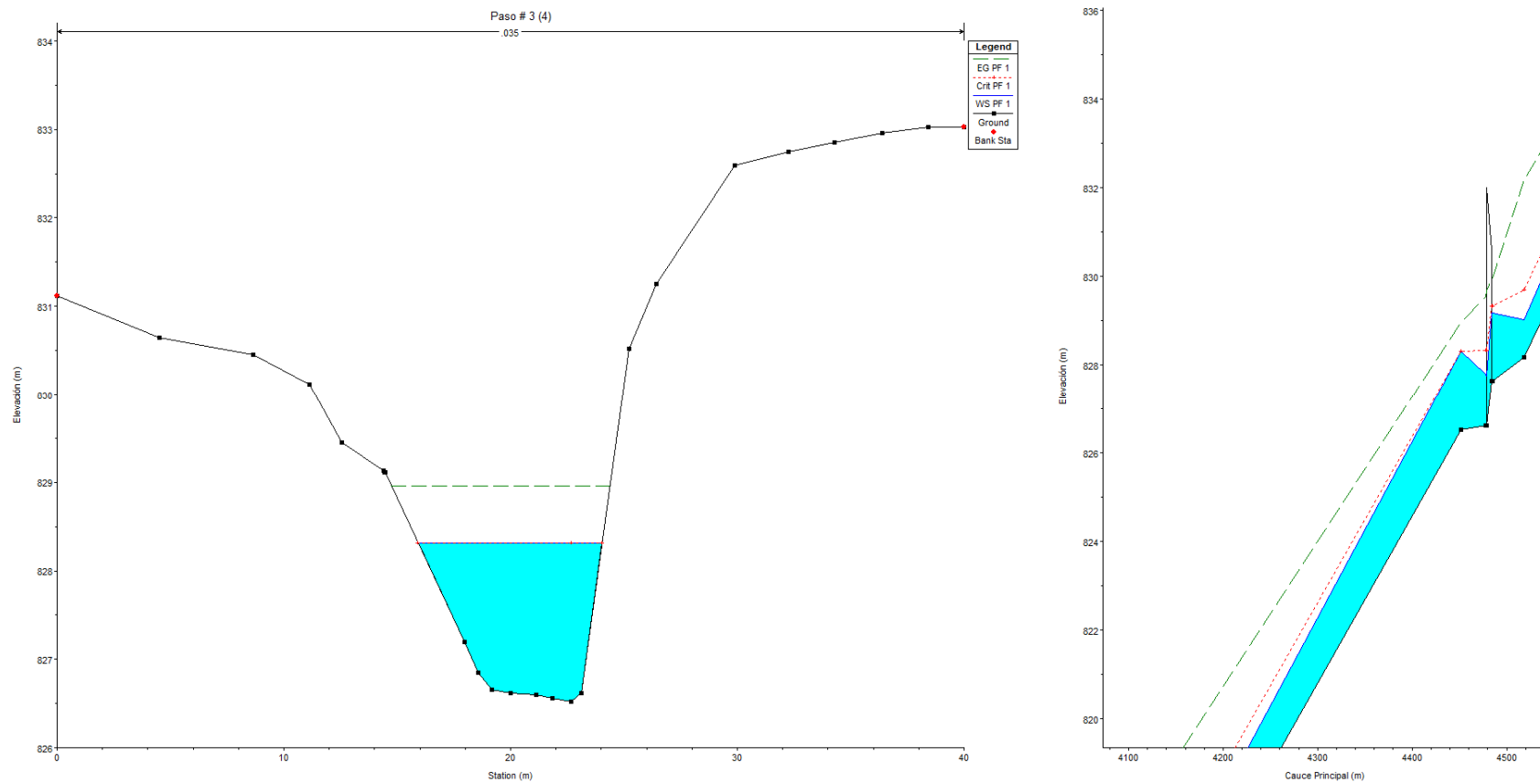
**Figura 78. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 3 (aguas abajo).**

# Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



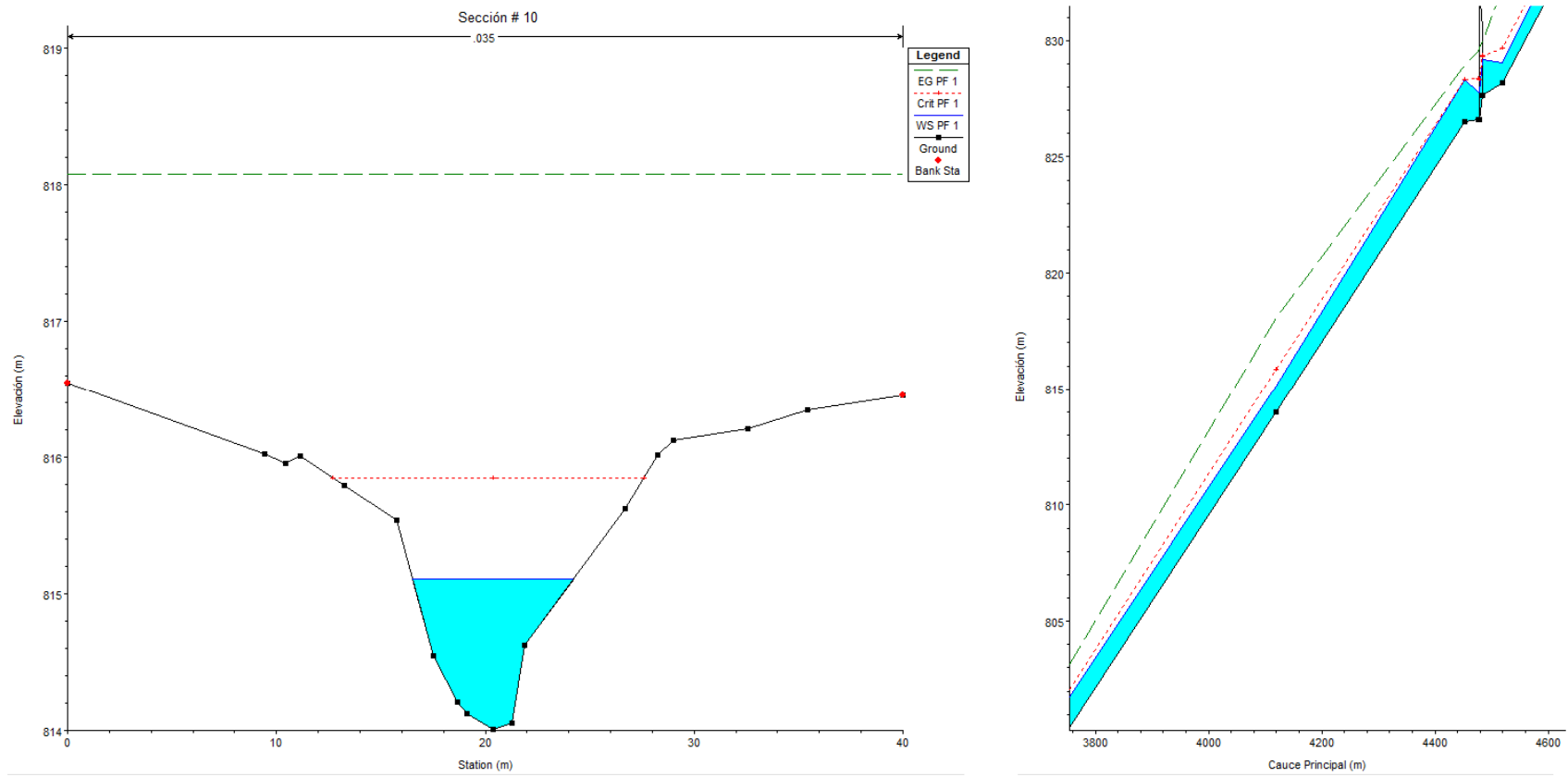


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



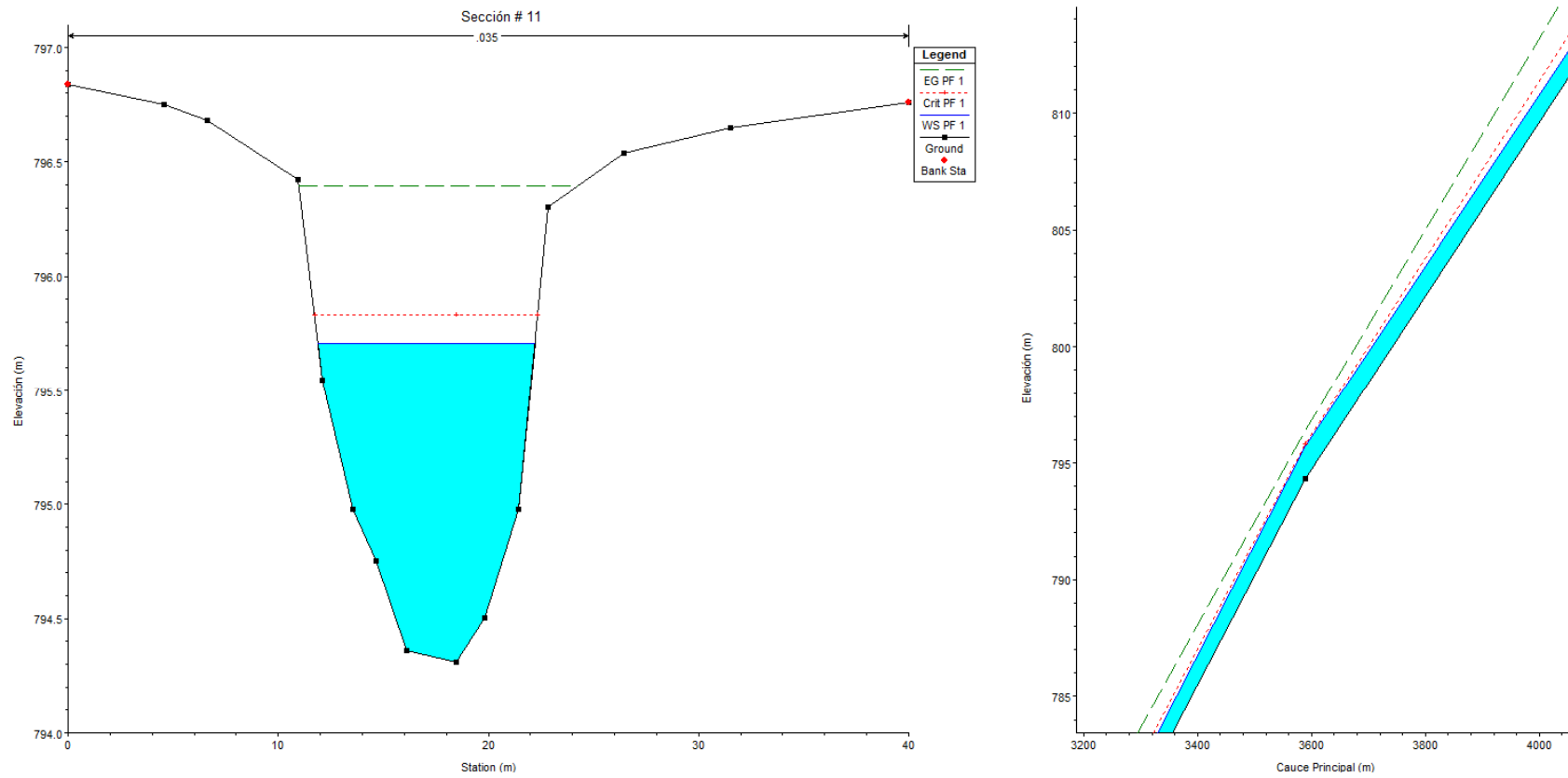
**Figura 80. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 3 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



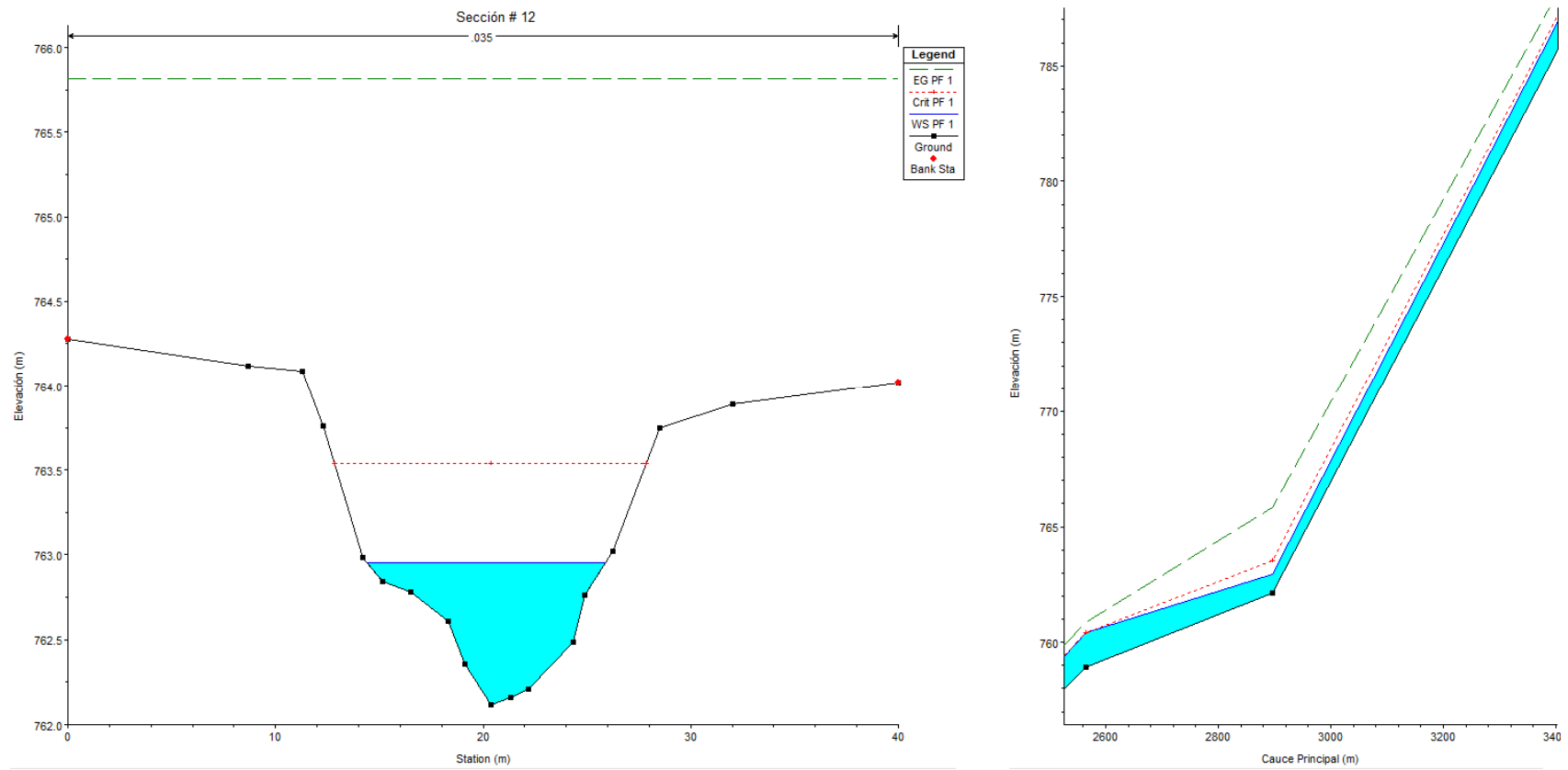
**Figura 81. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 10**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



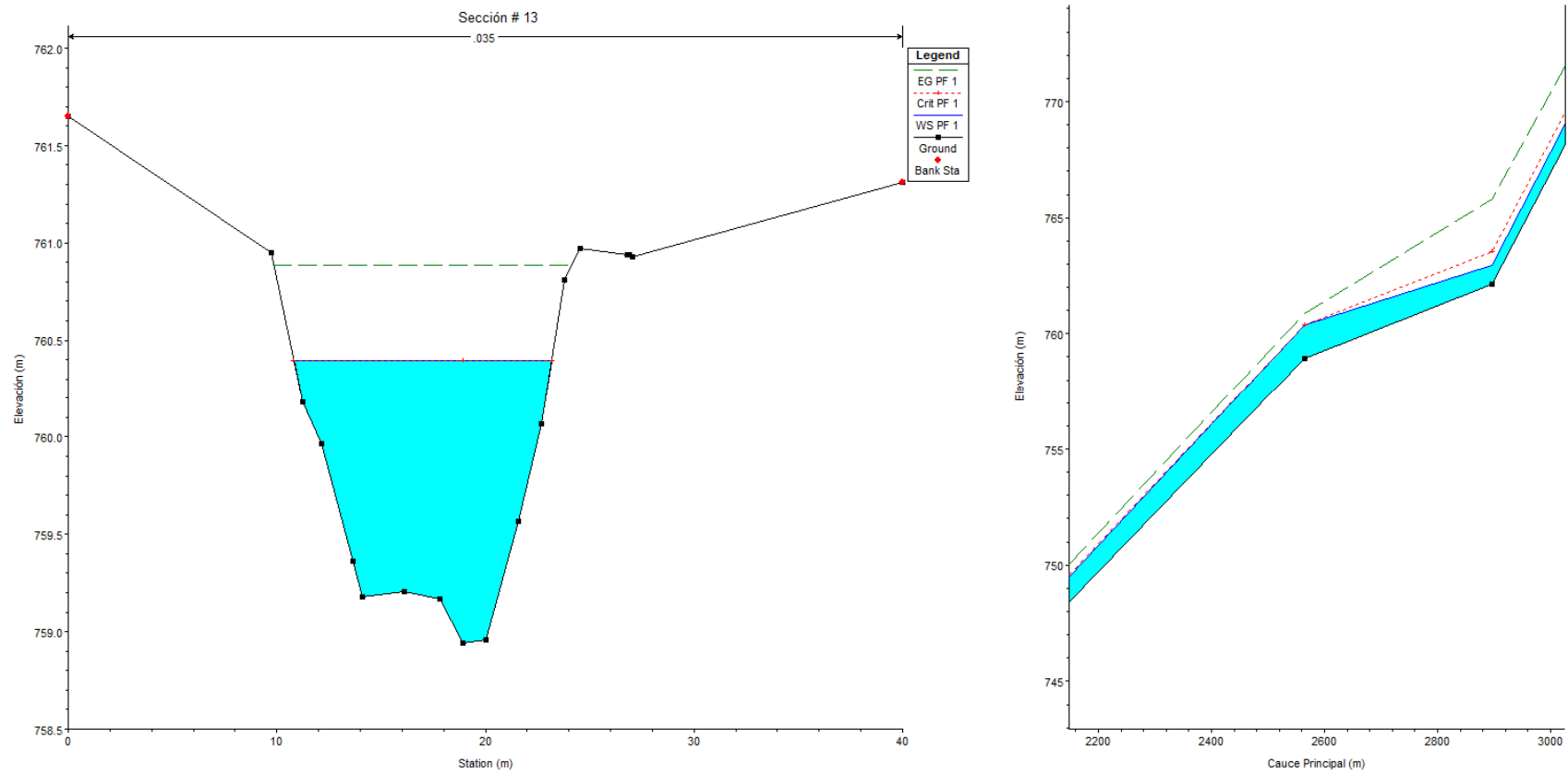
**Figura 82. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 11**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



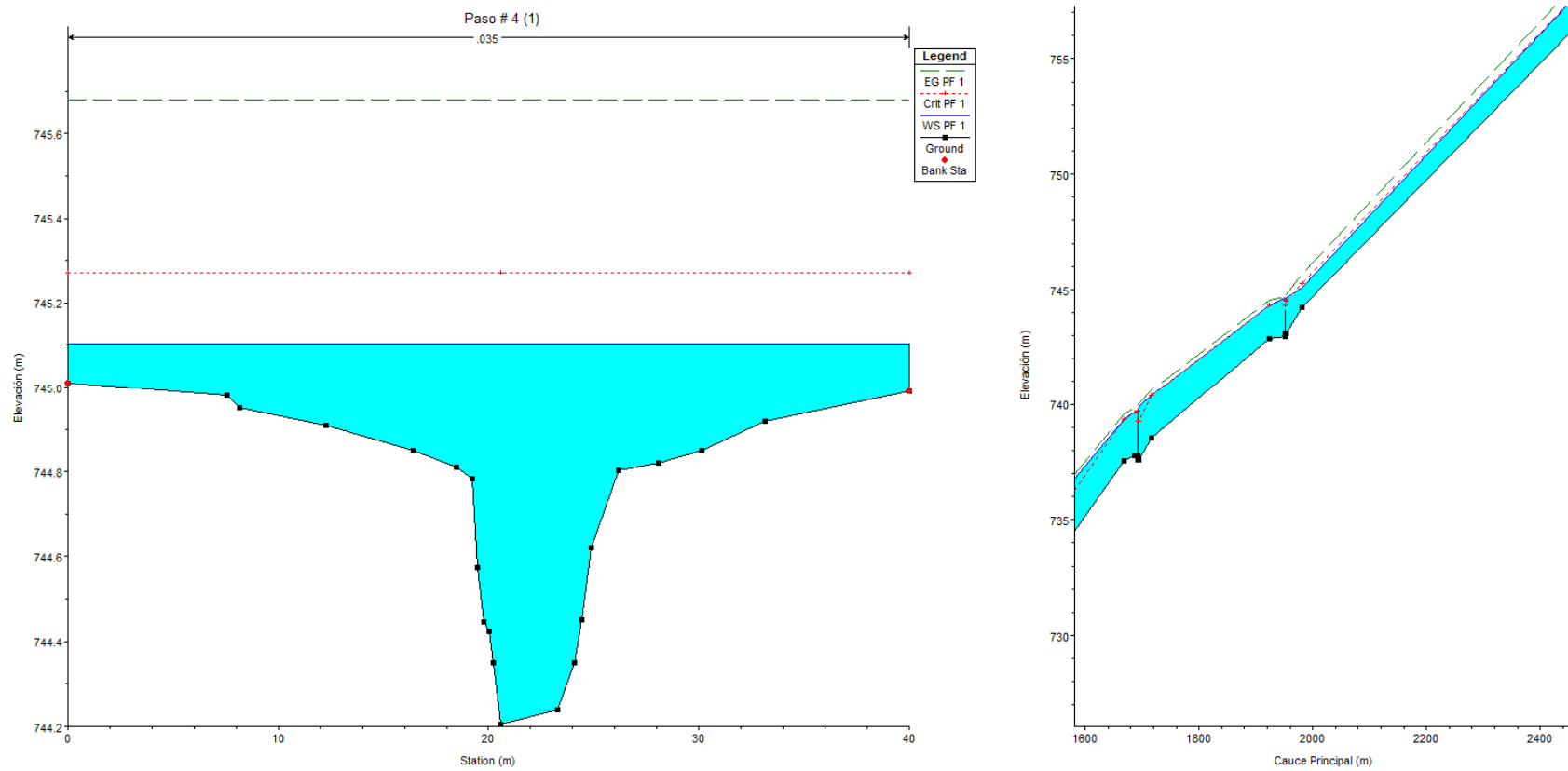
**Figura 83. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 12**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



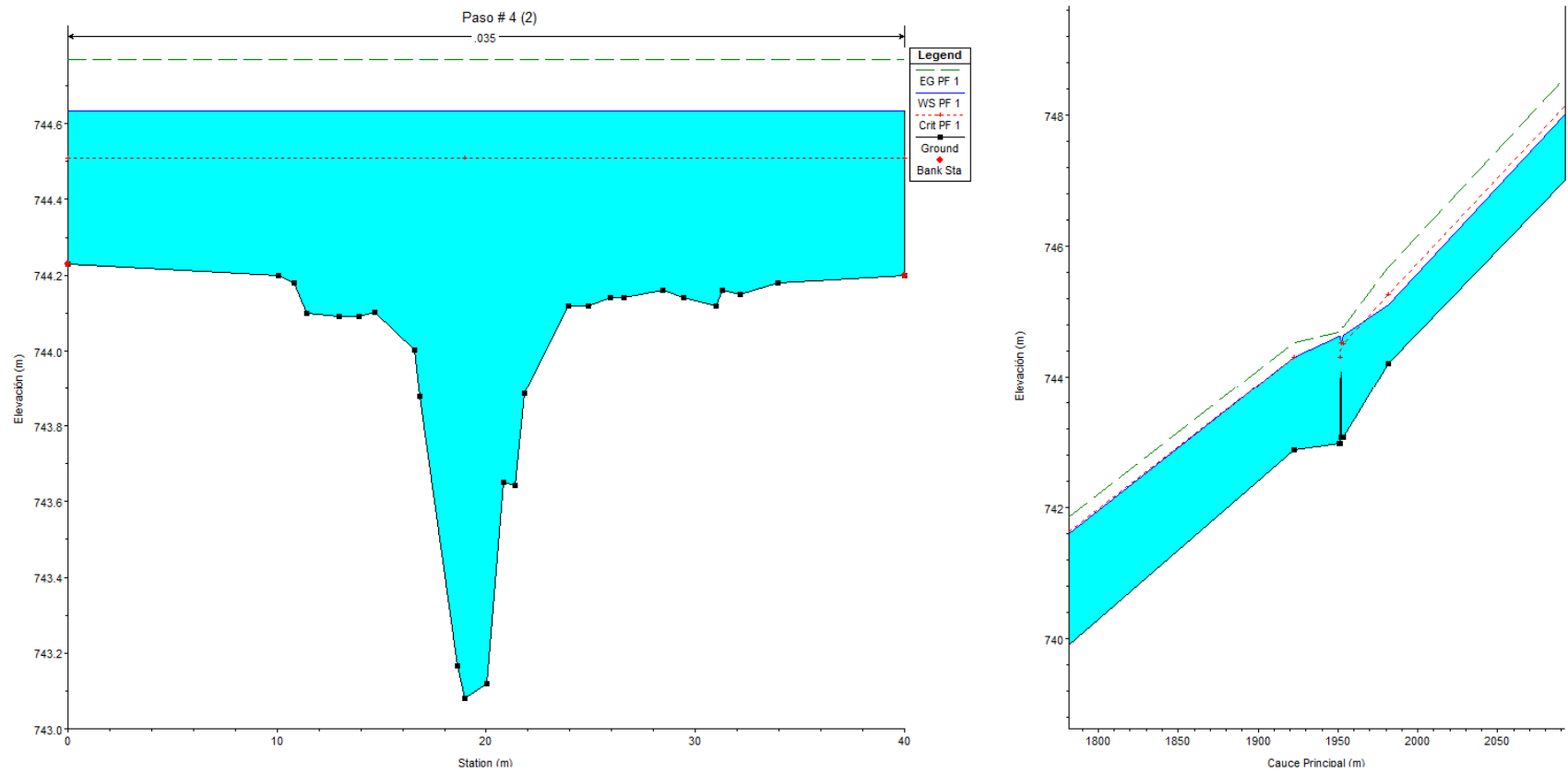
**Figura 84. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 13**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



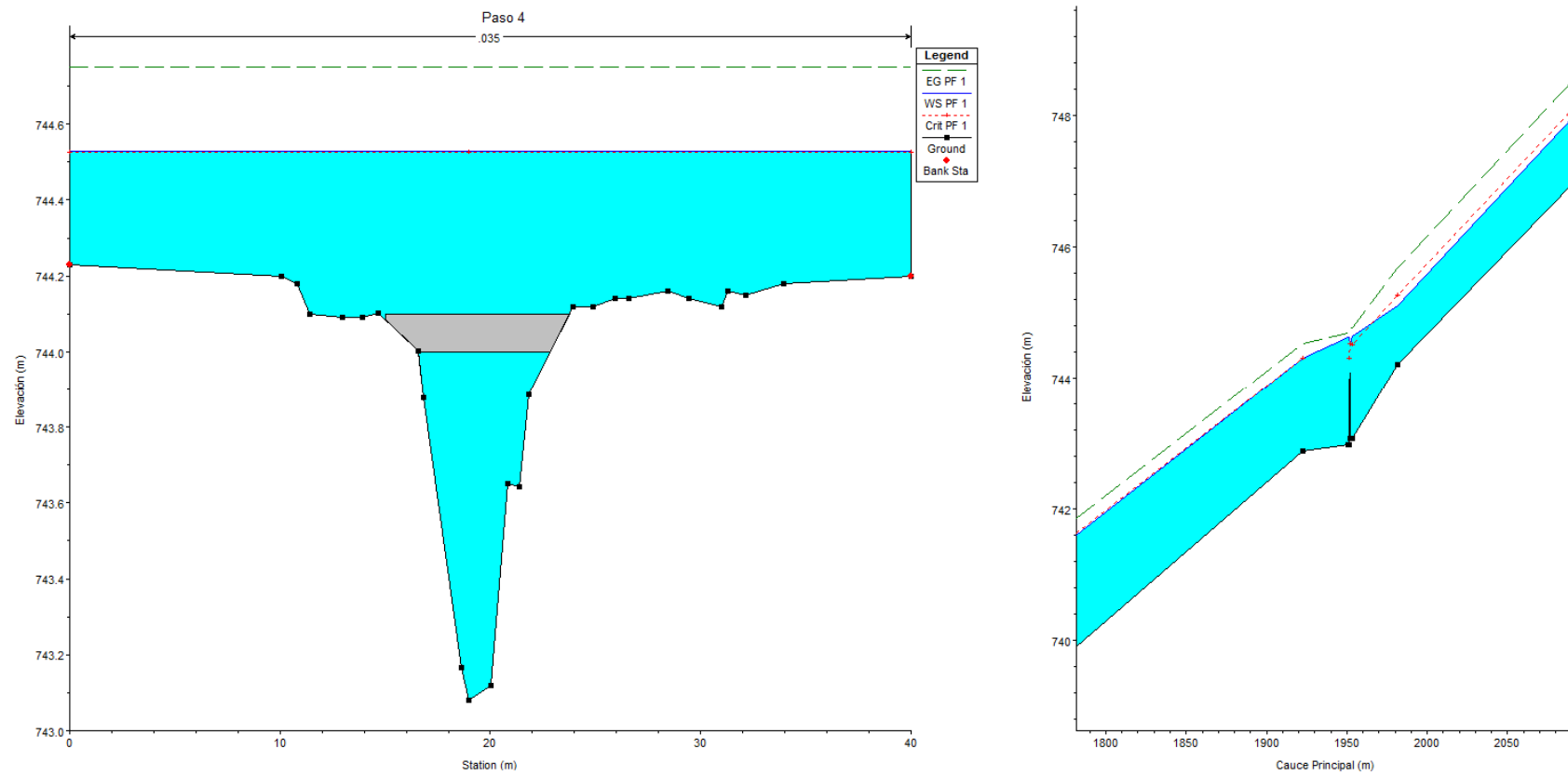
**Figura 85. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 86. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (2)**

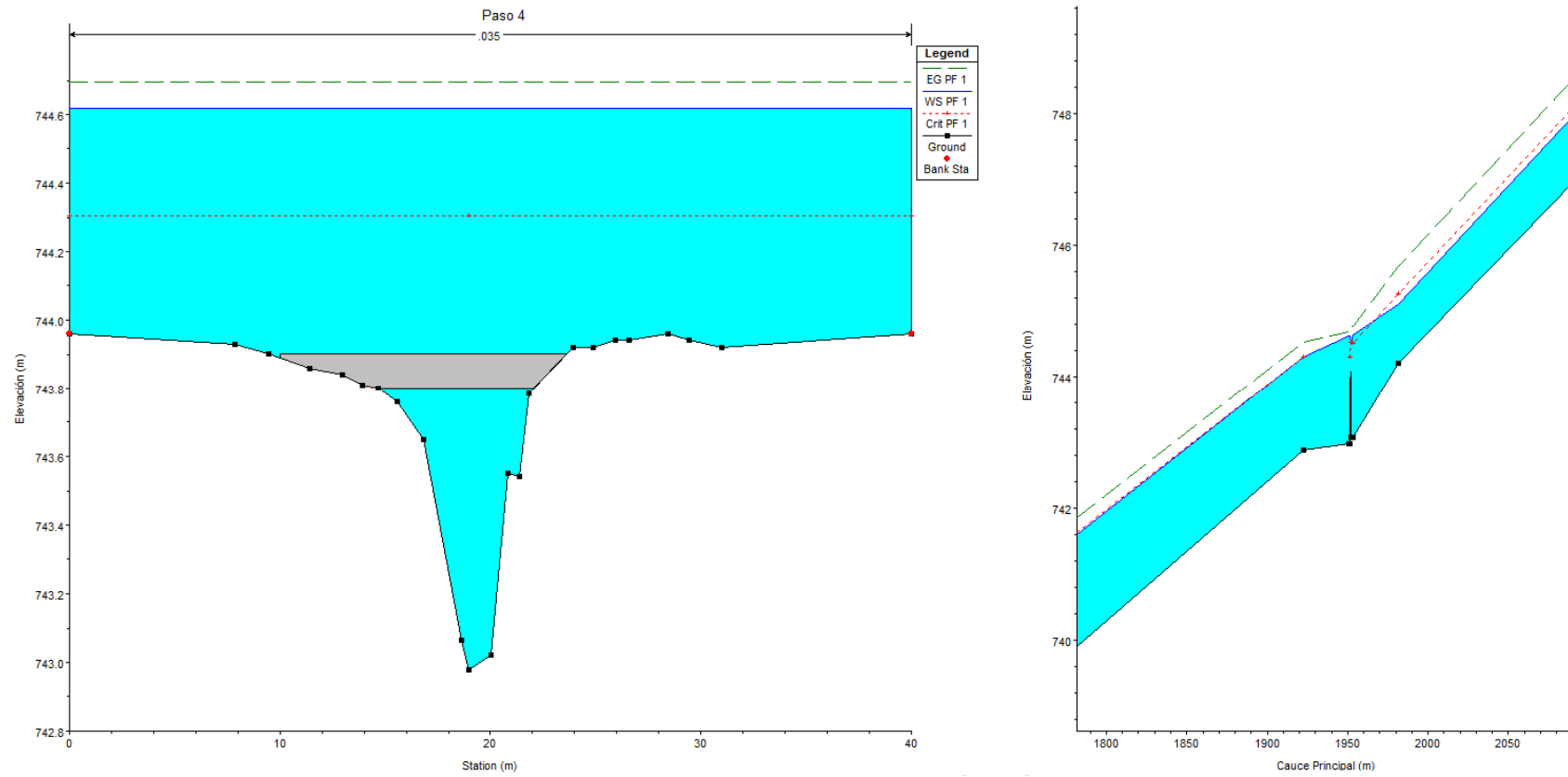
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 87. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 4 (aguas abajo).**

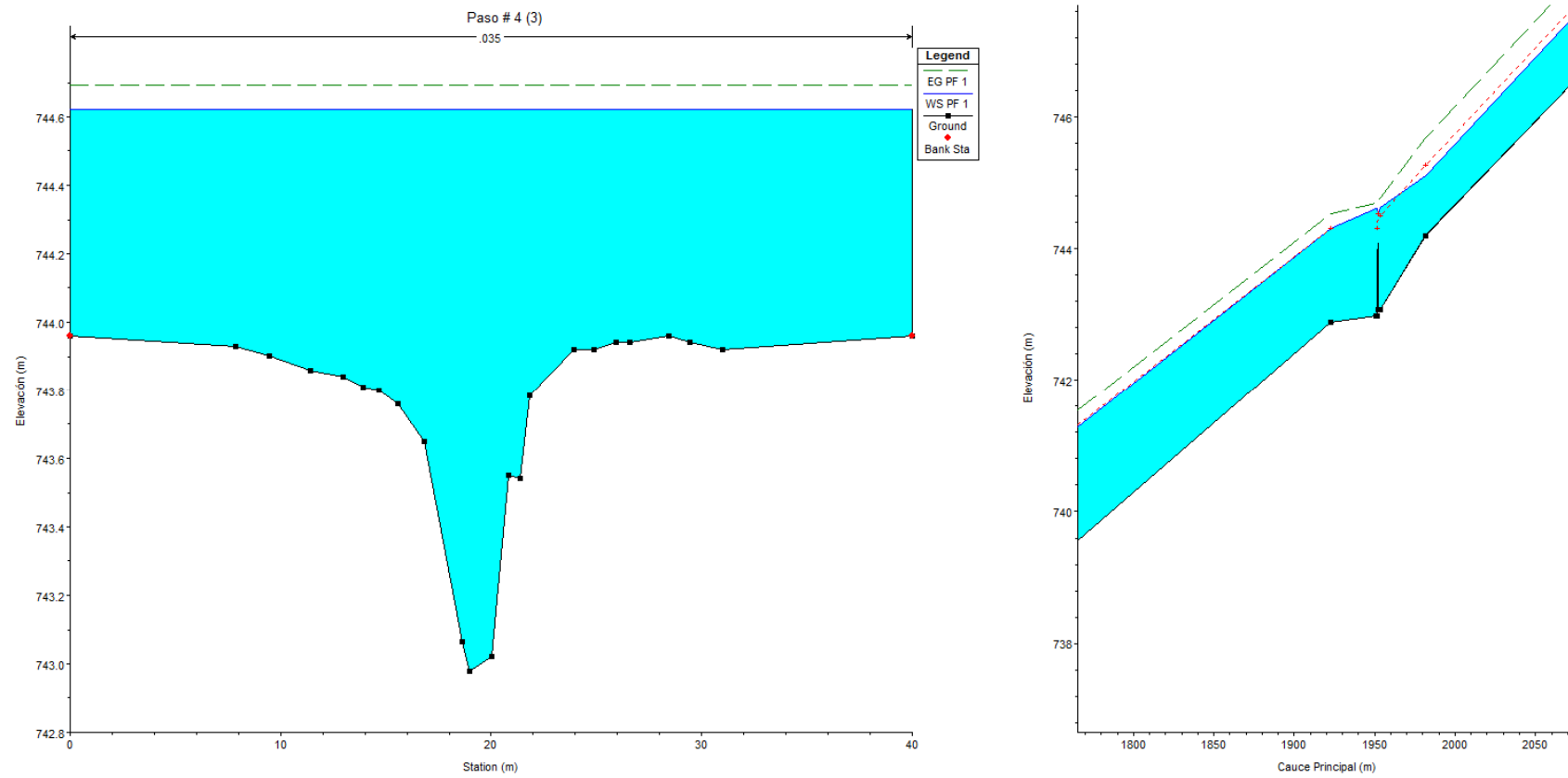


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



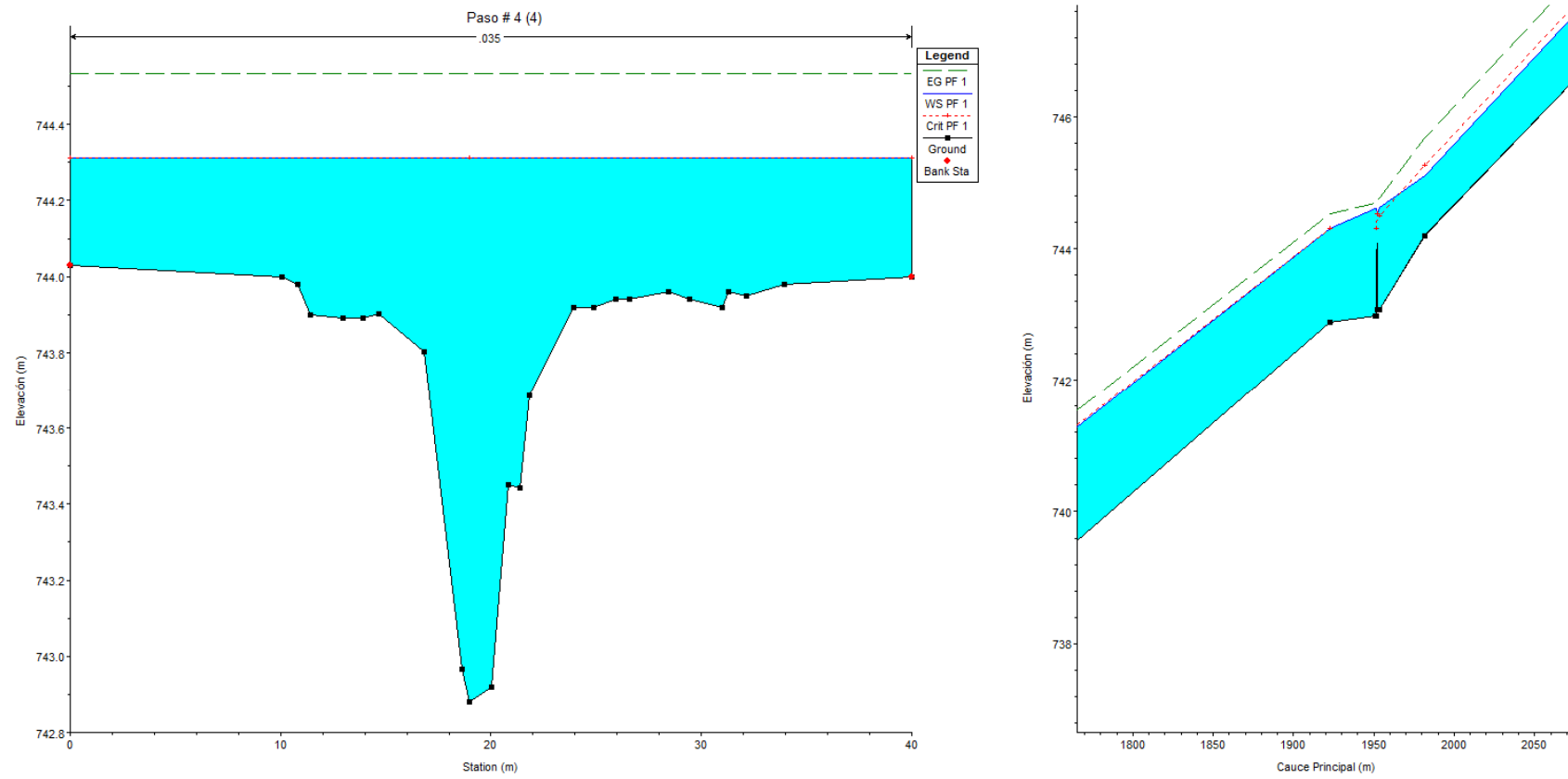
**Figura 88. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 4 (aguas arriba).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



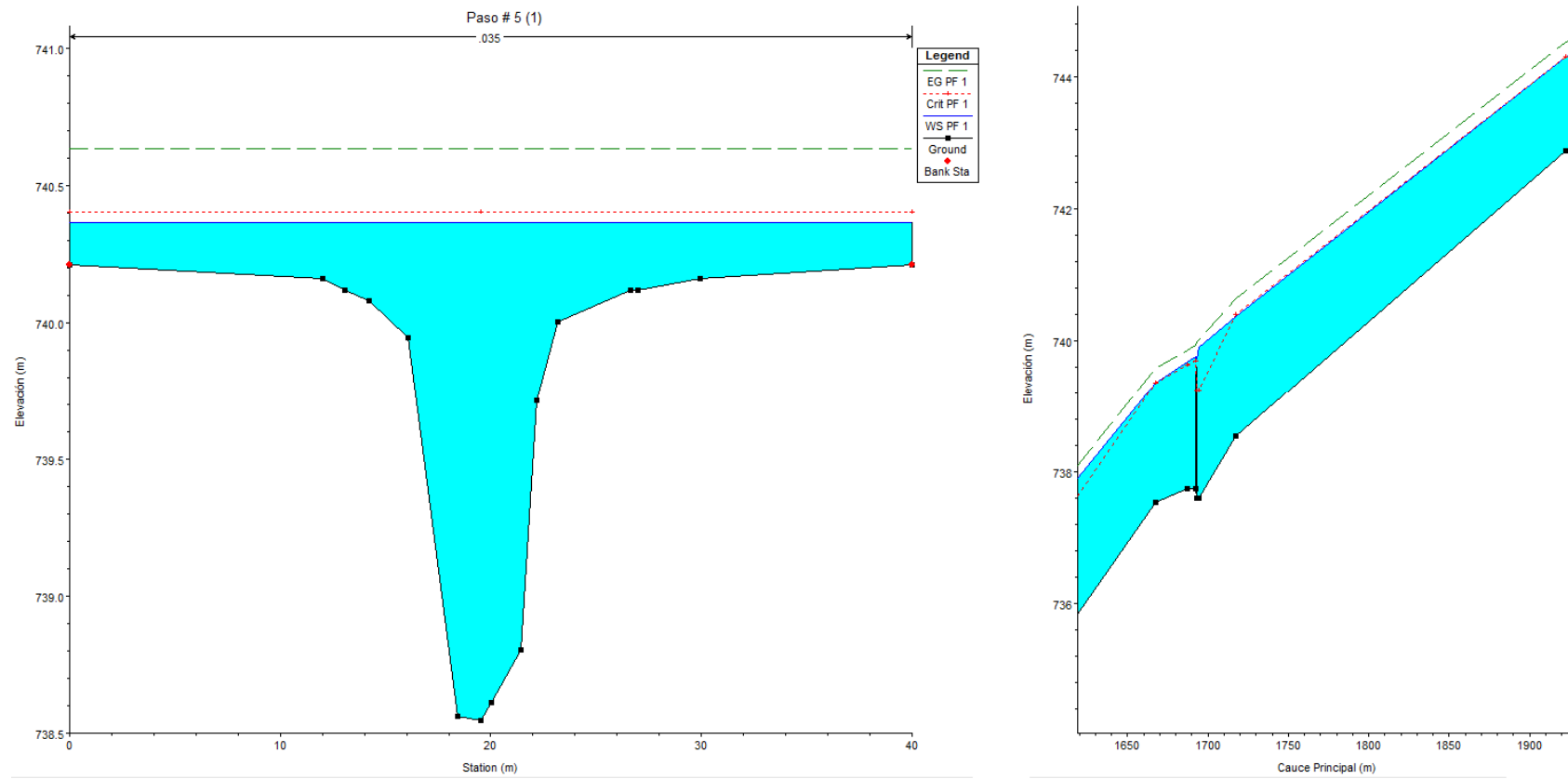
**Figura 89. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (3)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



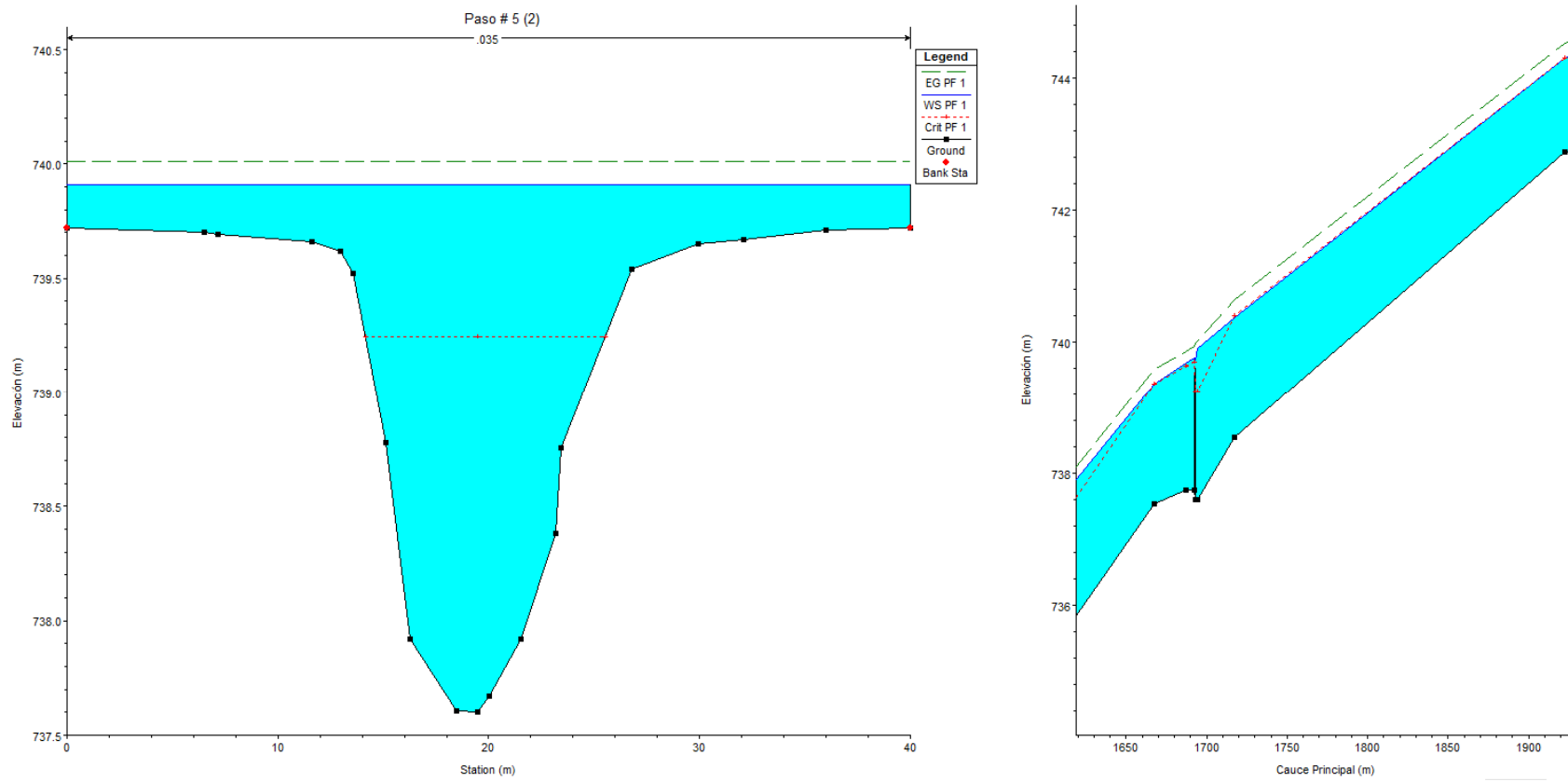
**Figura 90. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 4 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



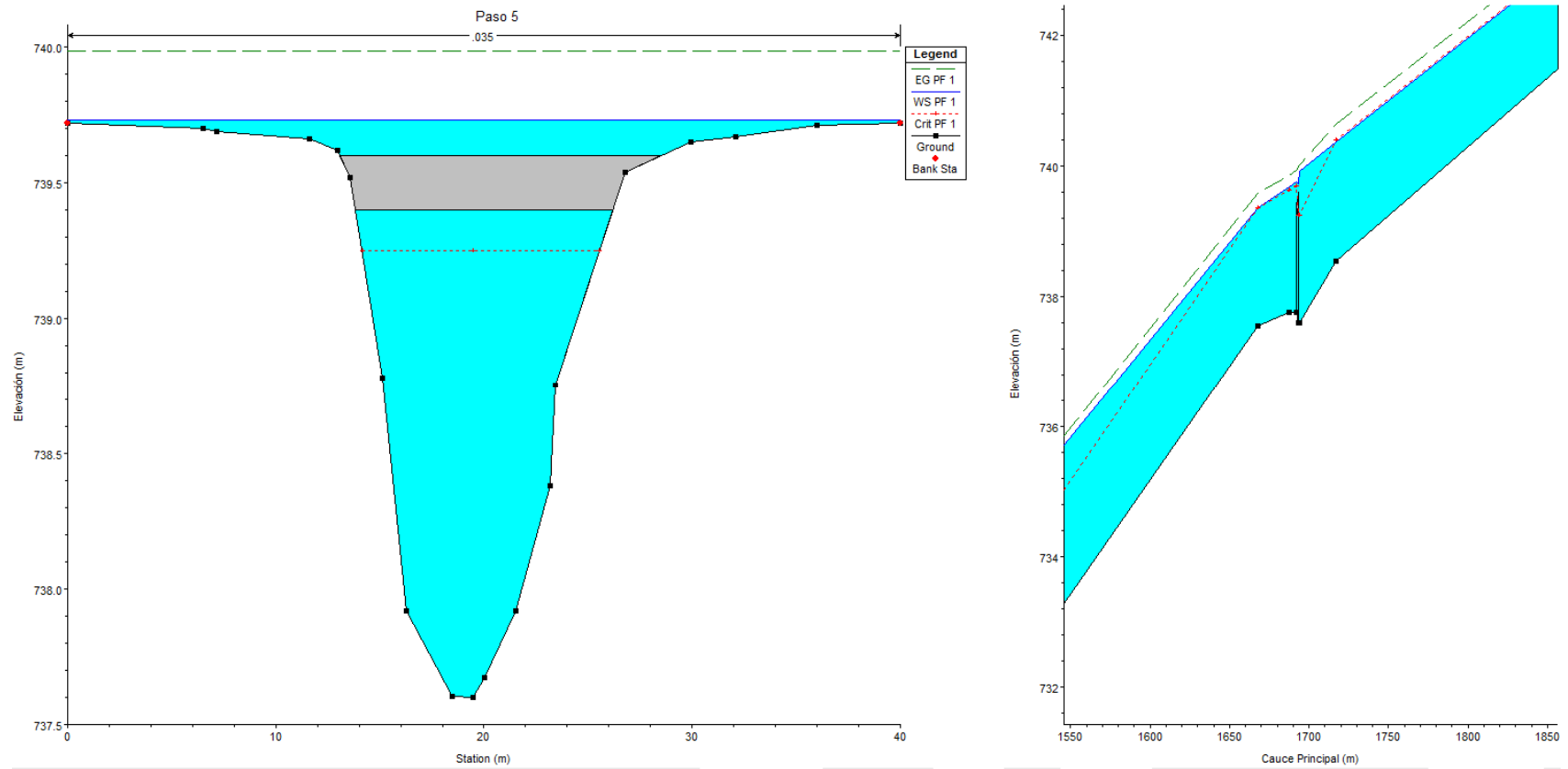
**Figura 91. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



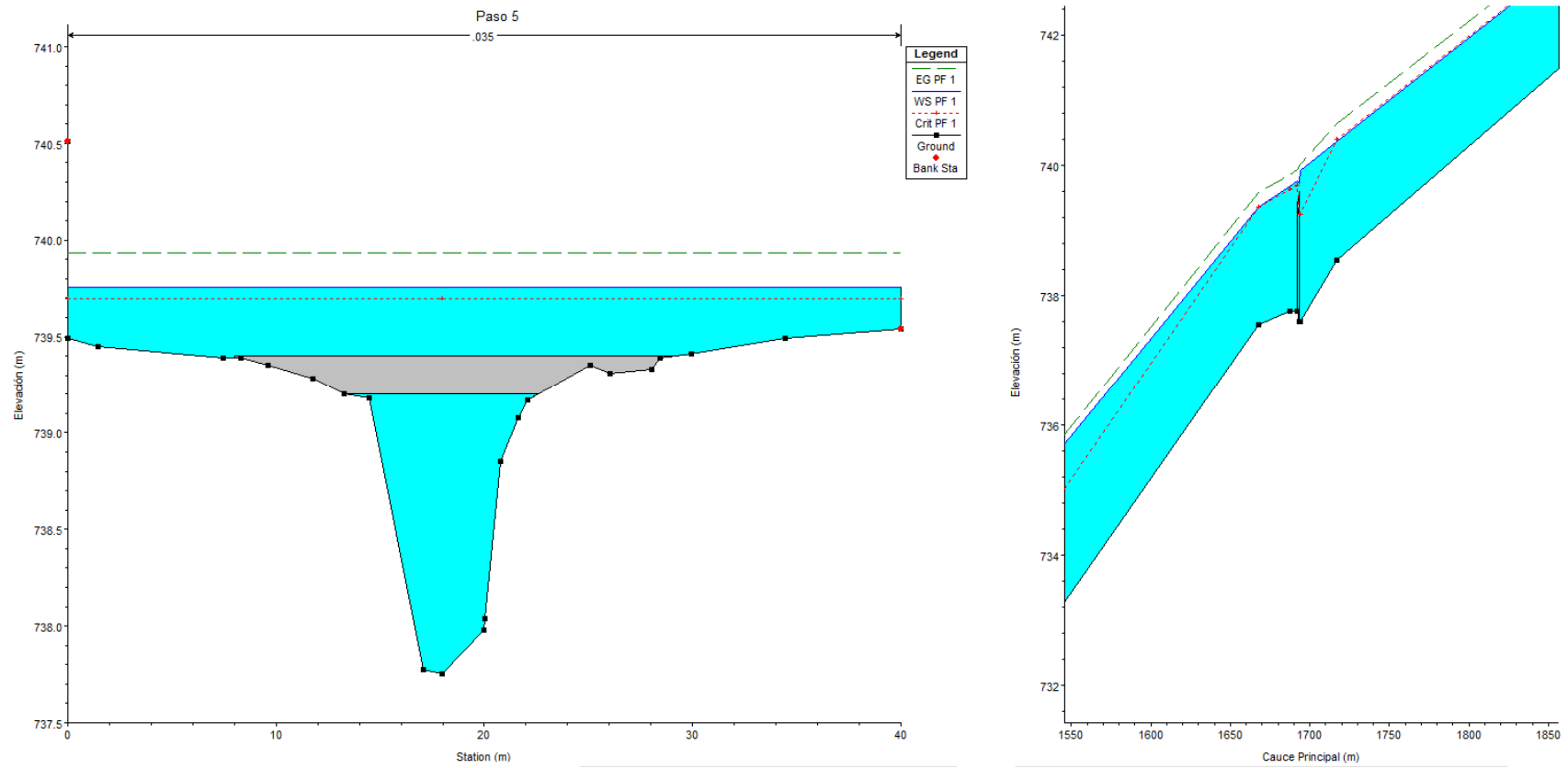
**Figura 92. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



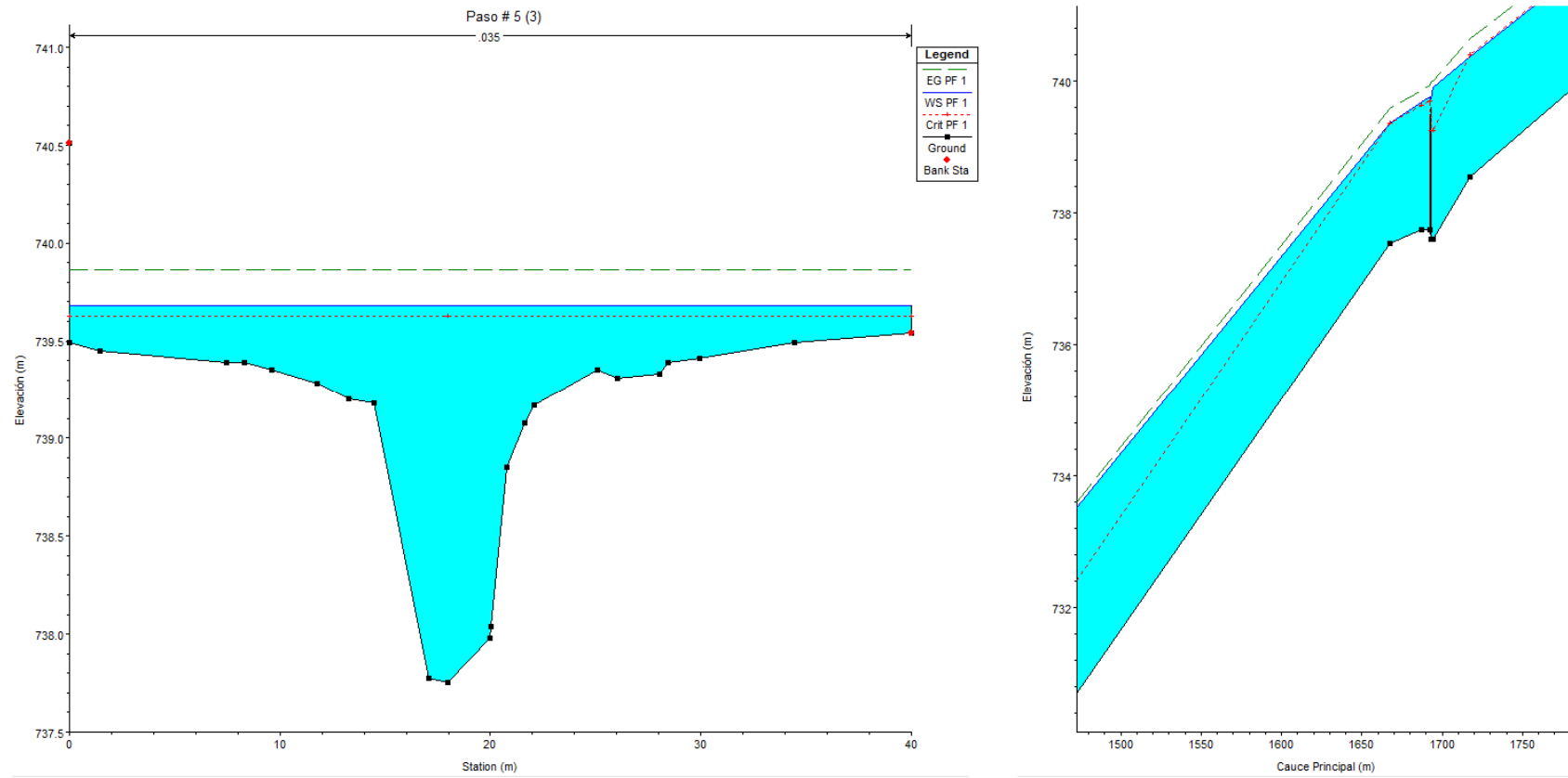
**Figura 93. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 5 (aguas abajo).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 94. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 5 (aguas arriba).**

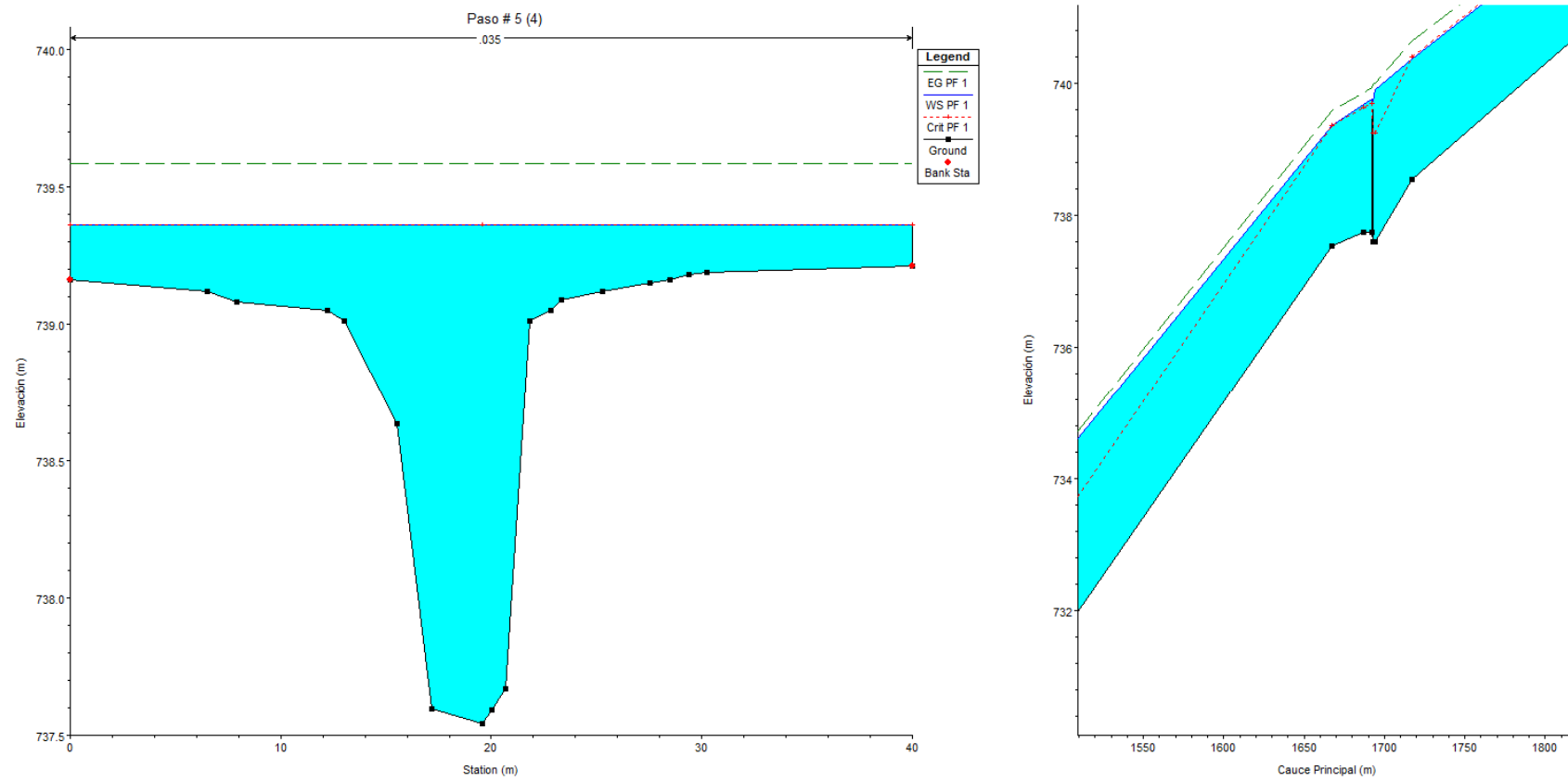
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 95. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (3)**

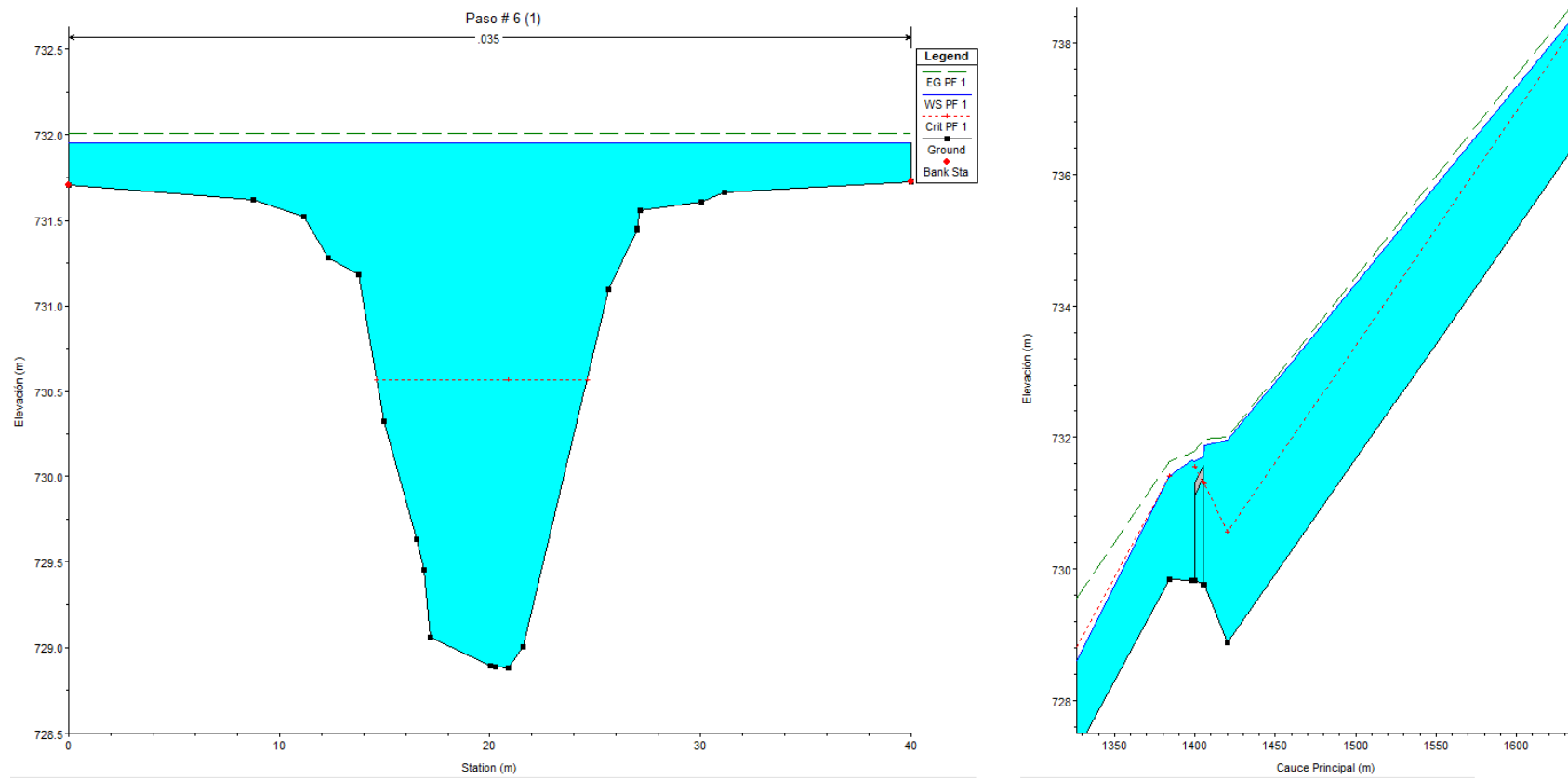


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



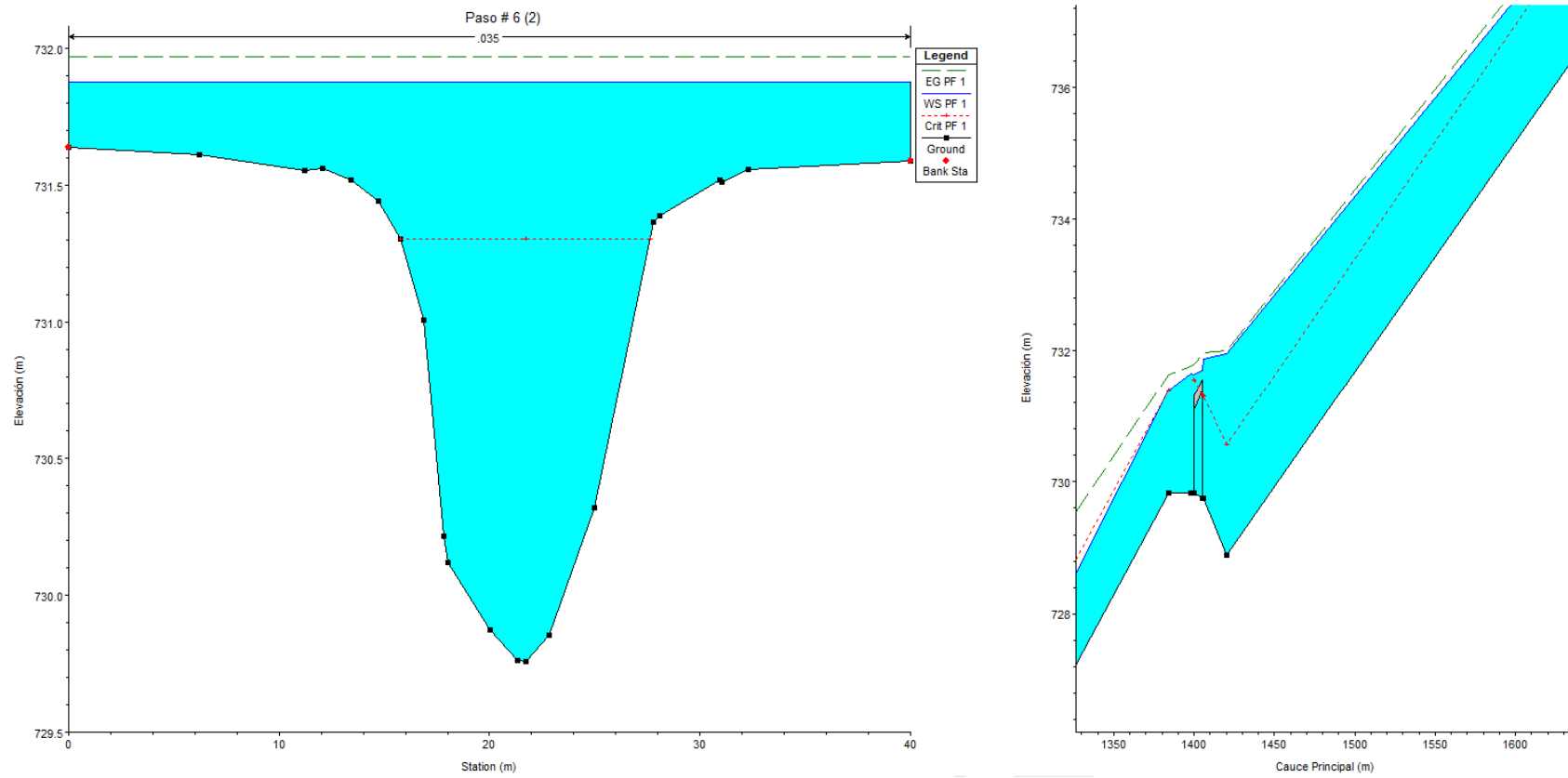
**Figura 96. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 5 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



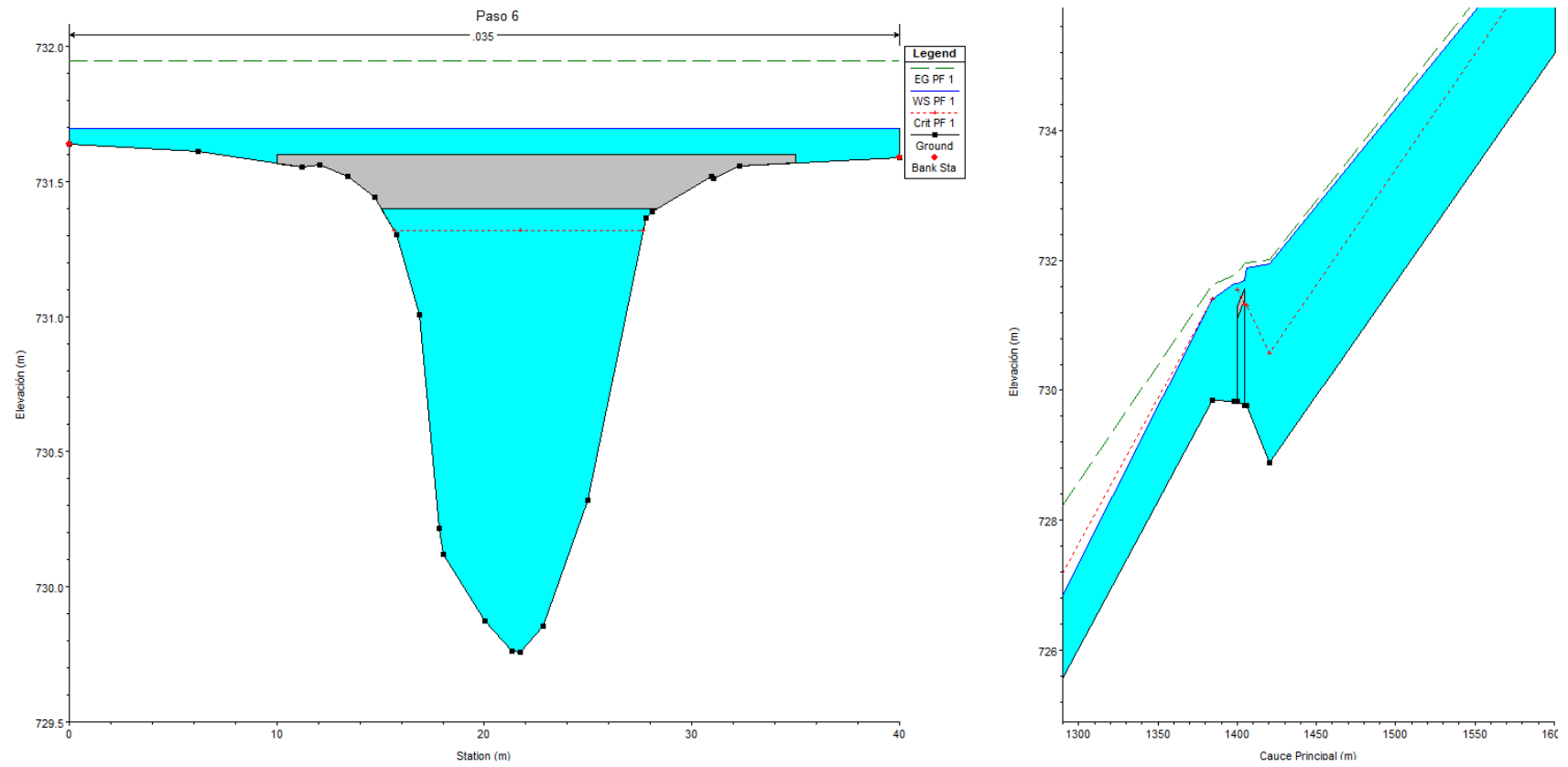
**Figura 97. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



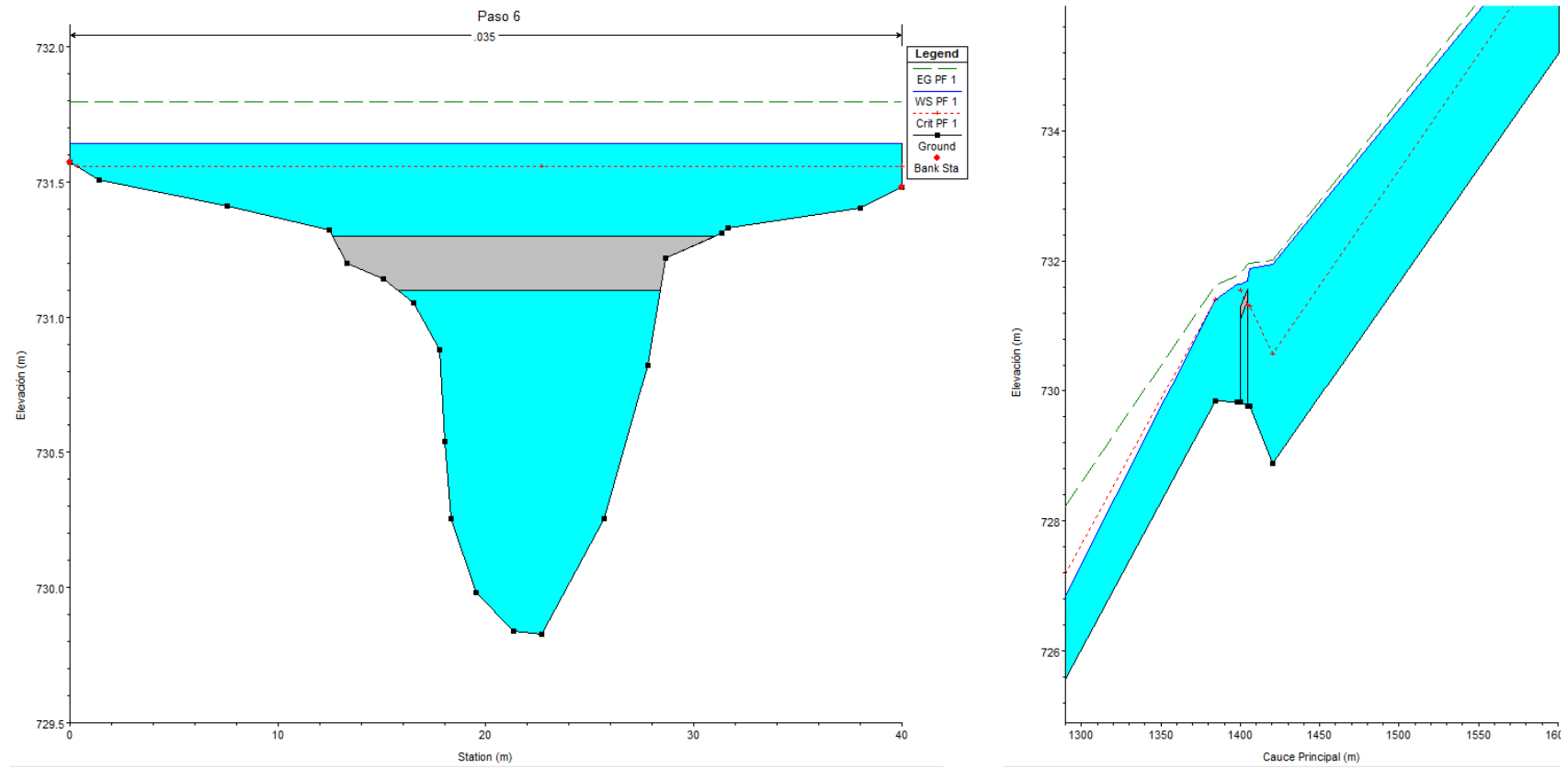
**Figura 98. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



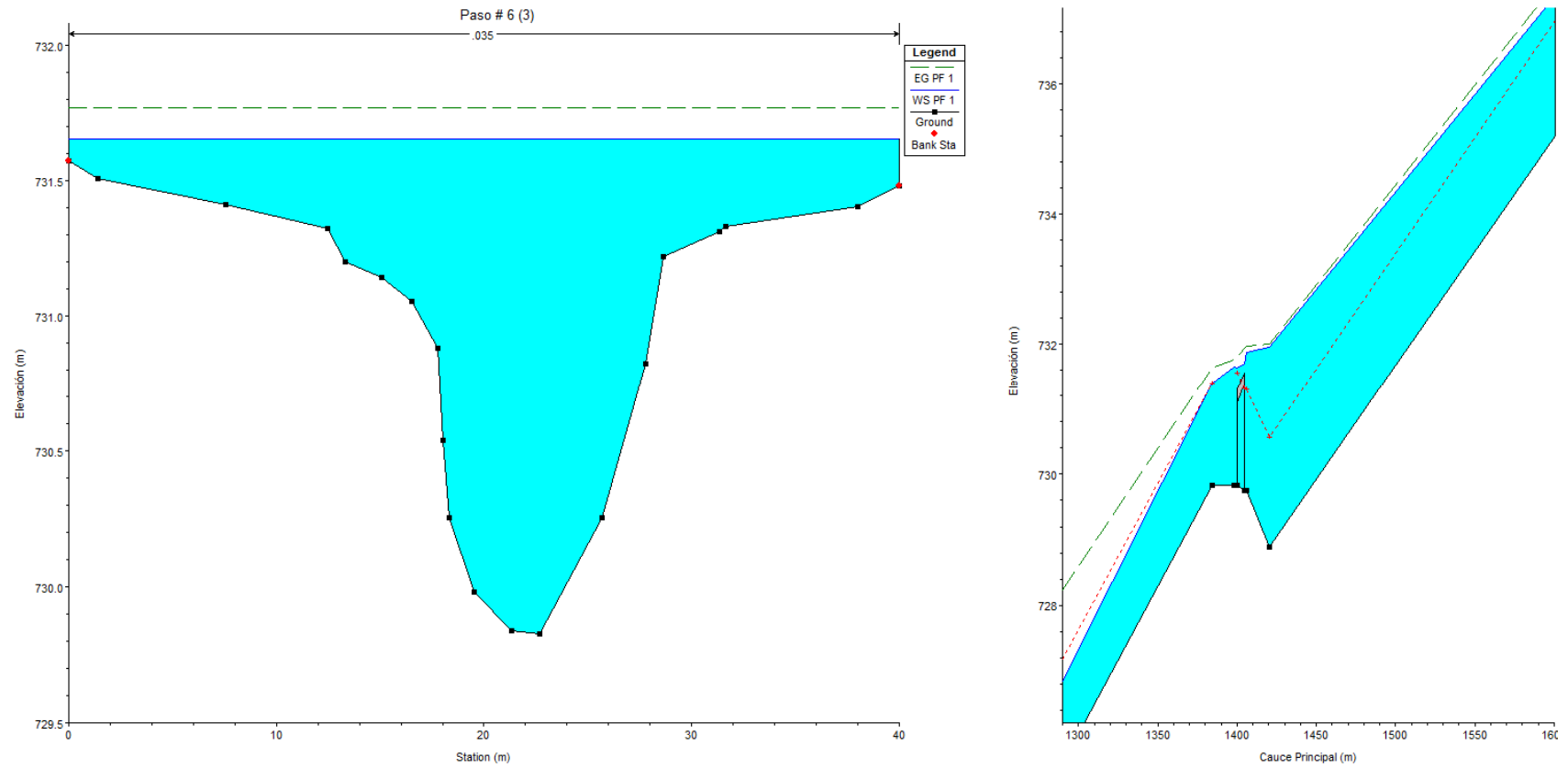
**Figura 99. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 6 (aguas abajo).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



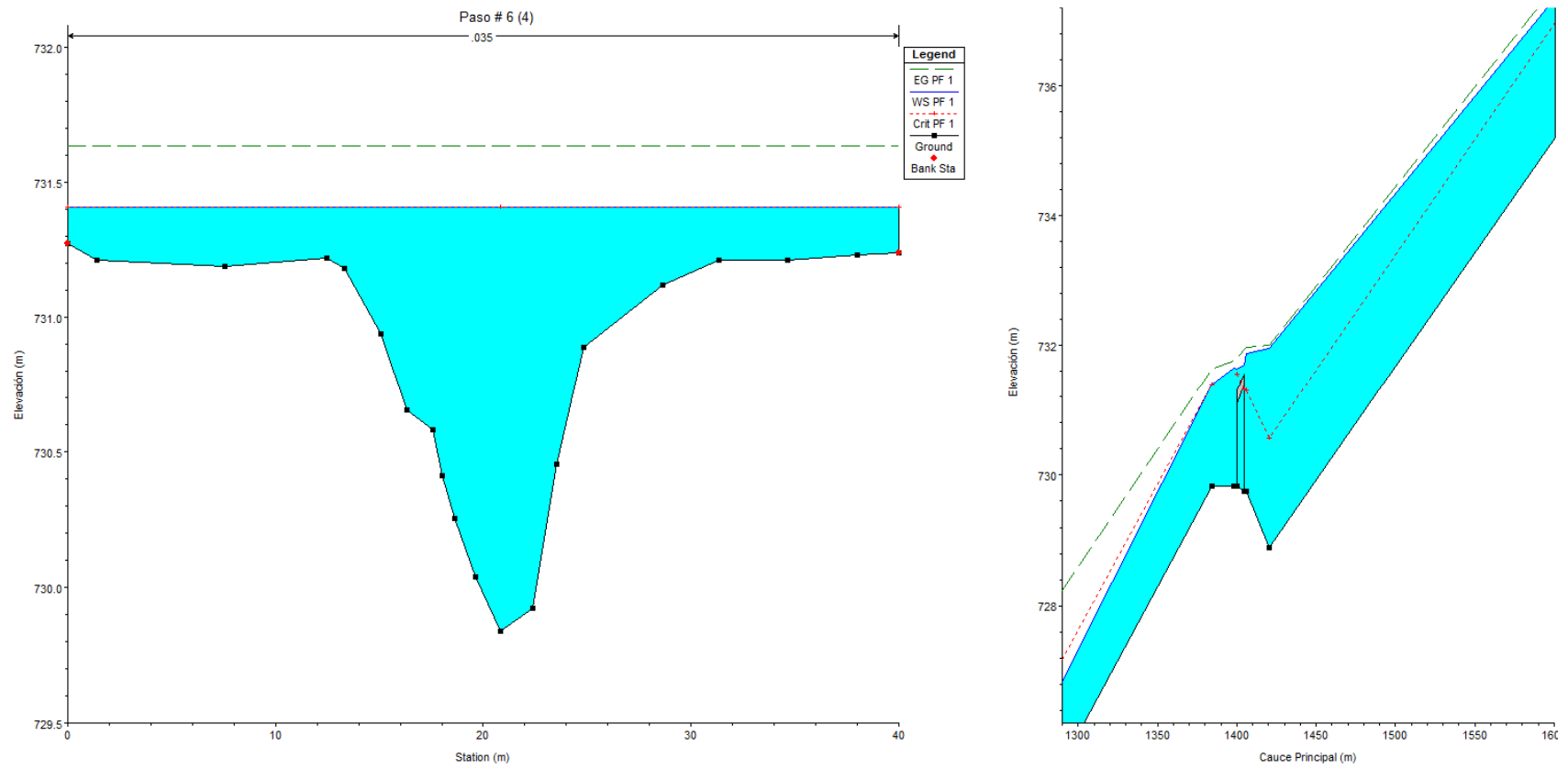
**Figura 100. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 6 (aguas arriba).**

# Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



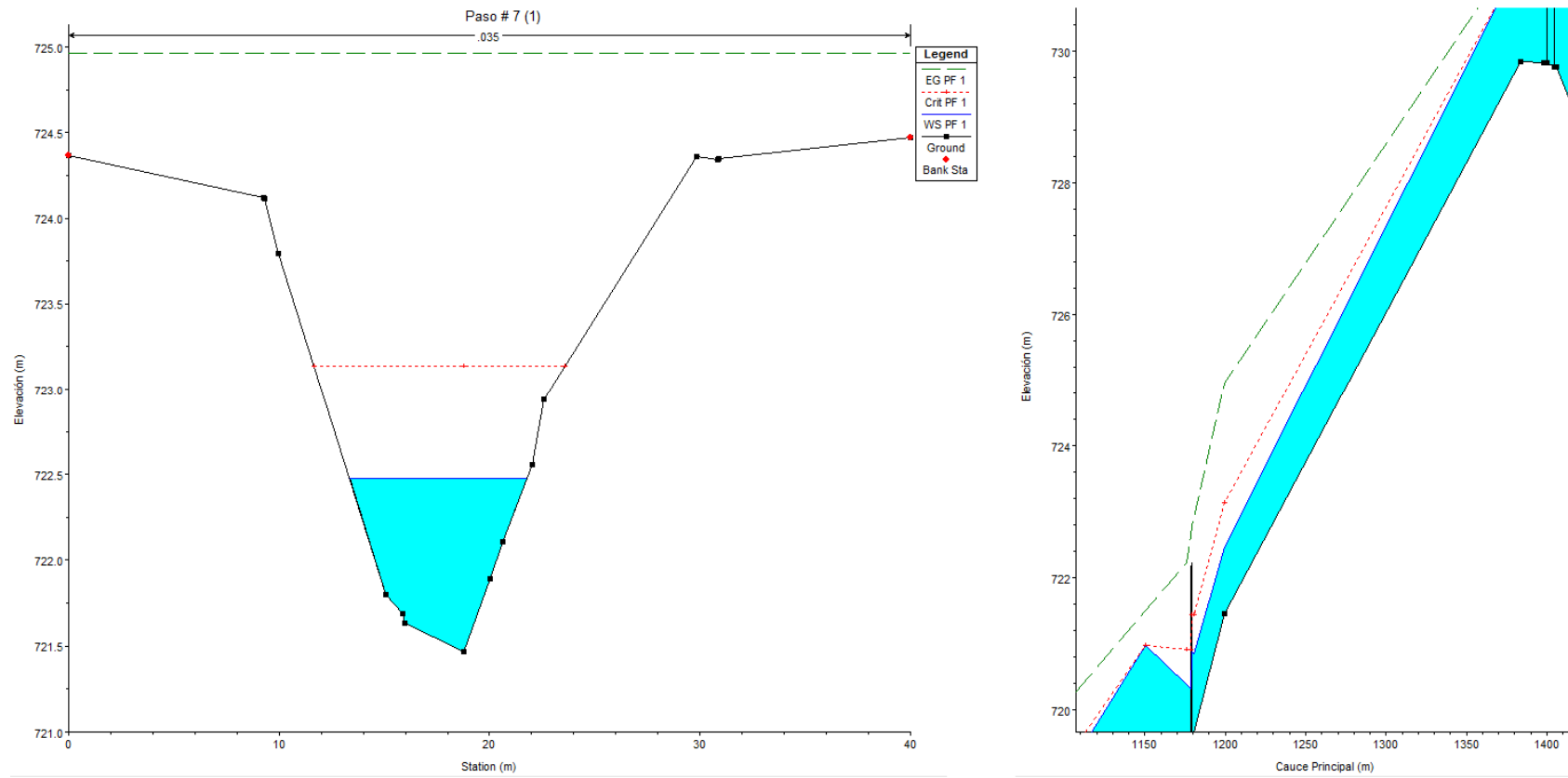
**Figura 101. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (3)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 102. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 6 (4)**

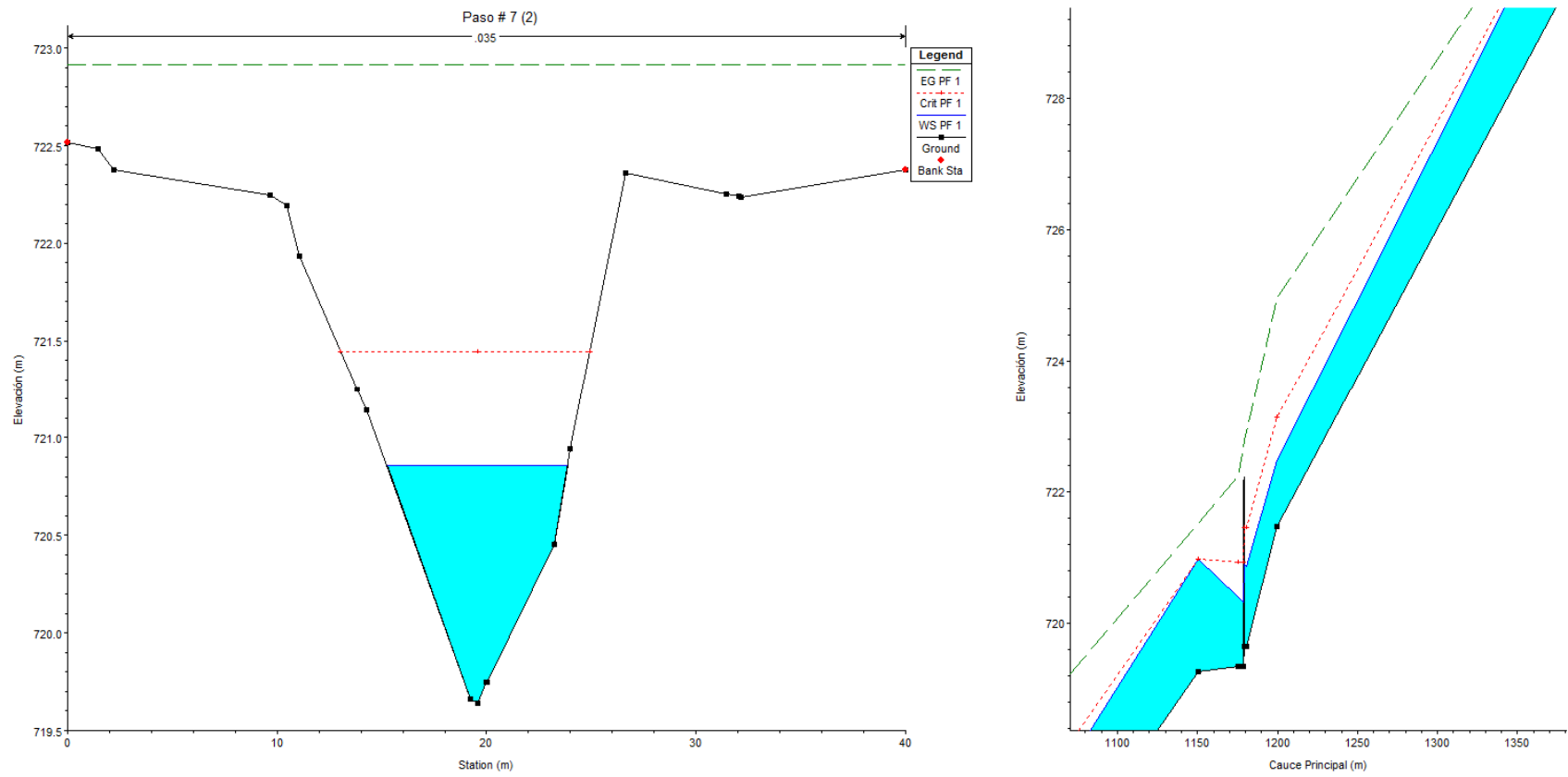
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 103. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 7 (1)**

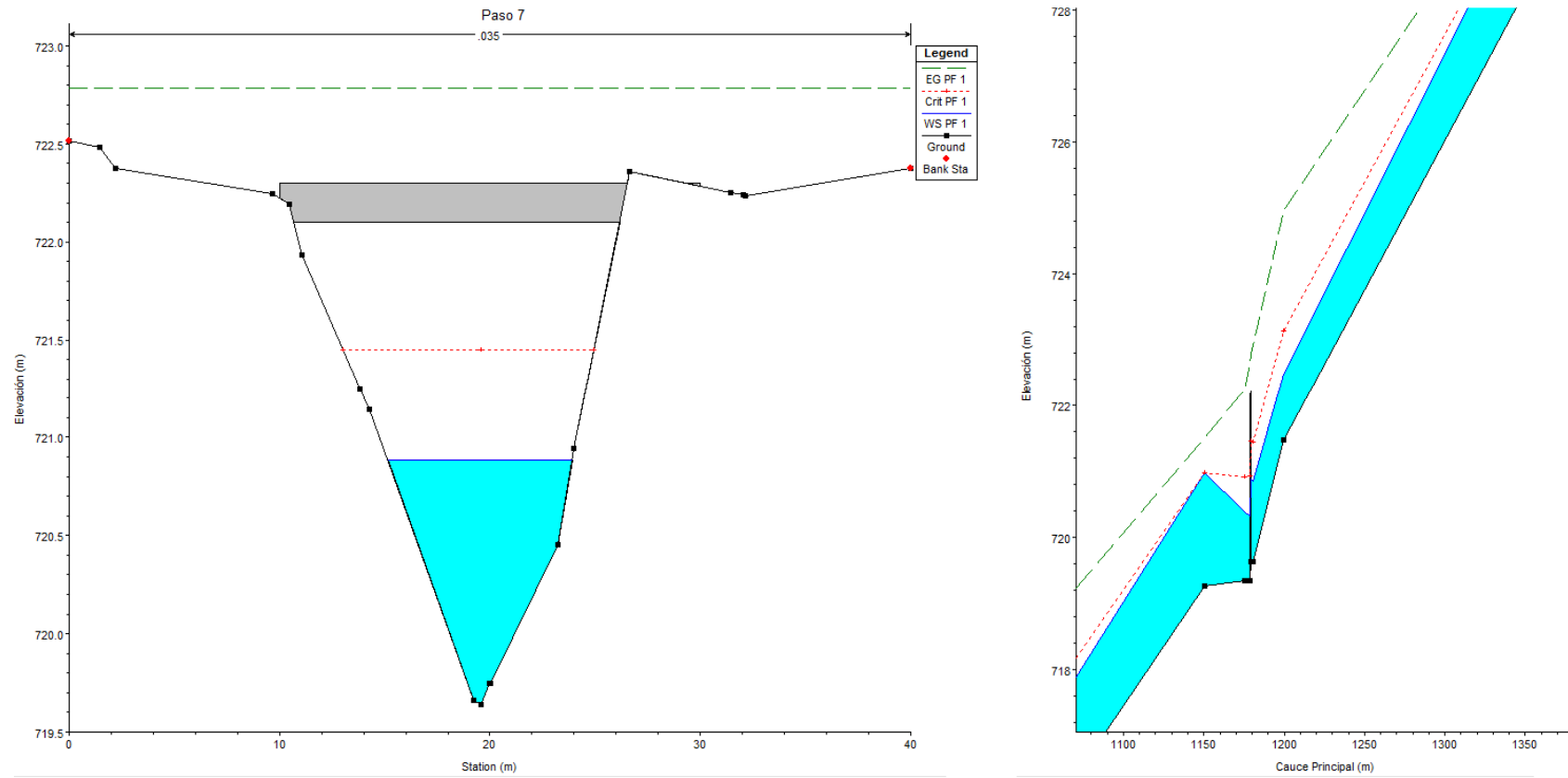


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



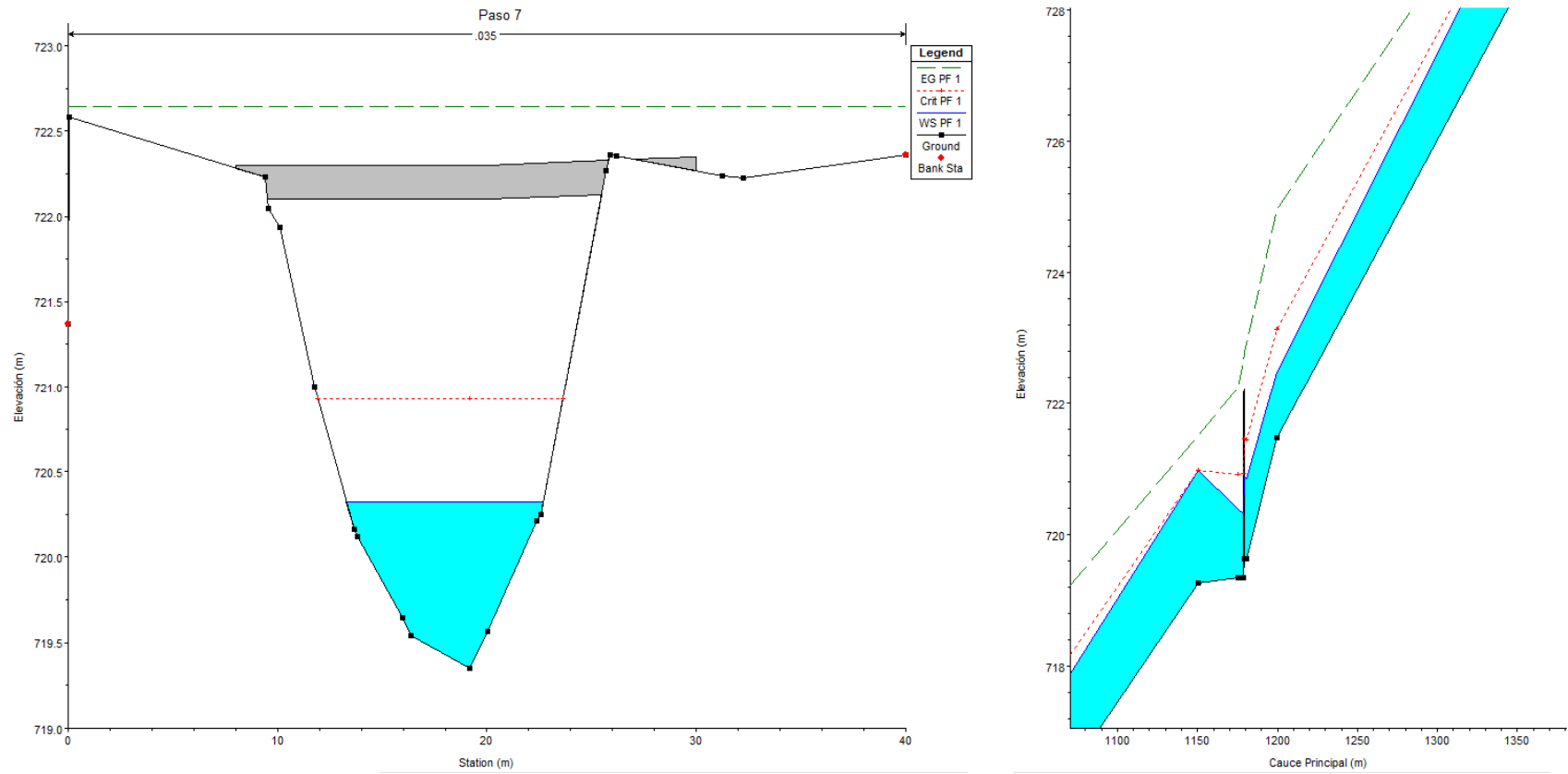
**Figura 104. Nivel de agua calculada para la sección paso # 7 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



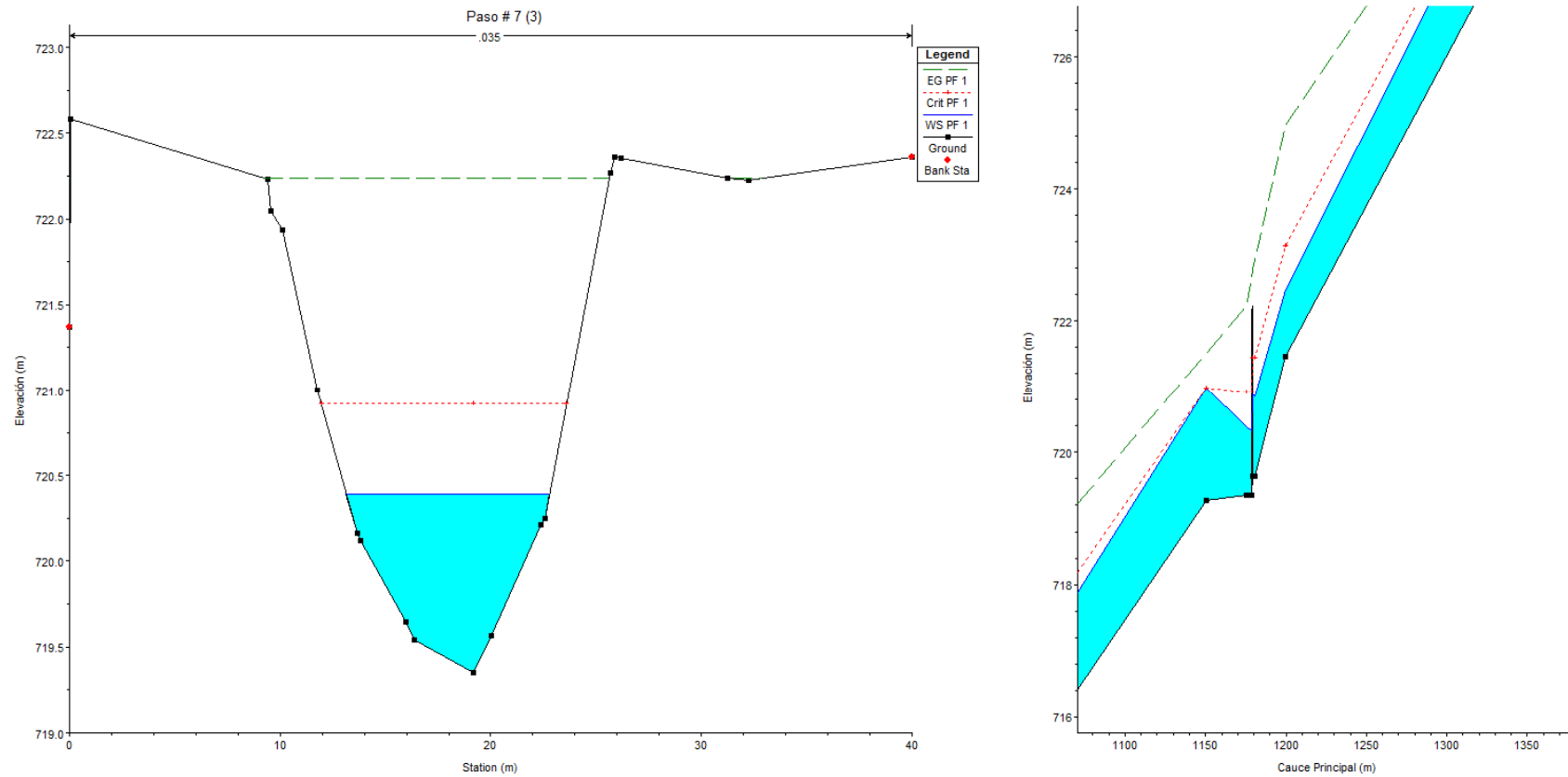
**Figura 105. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 7 (aguas abajo).**

Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



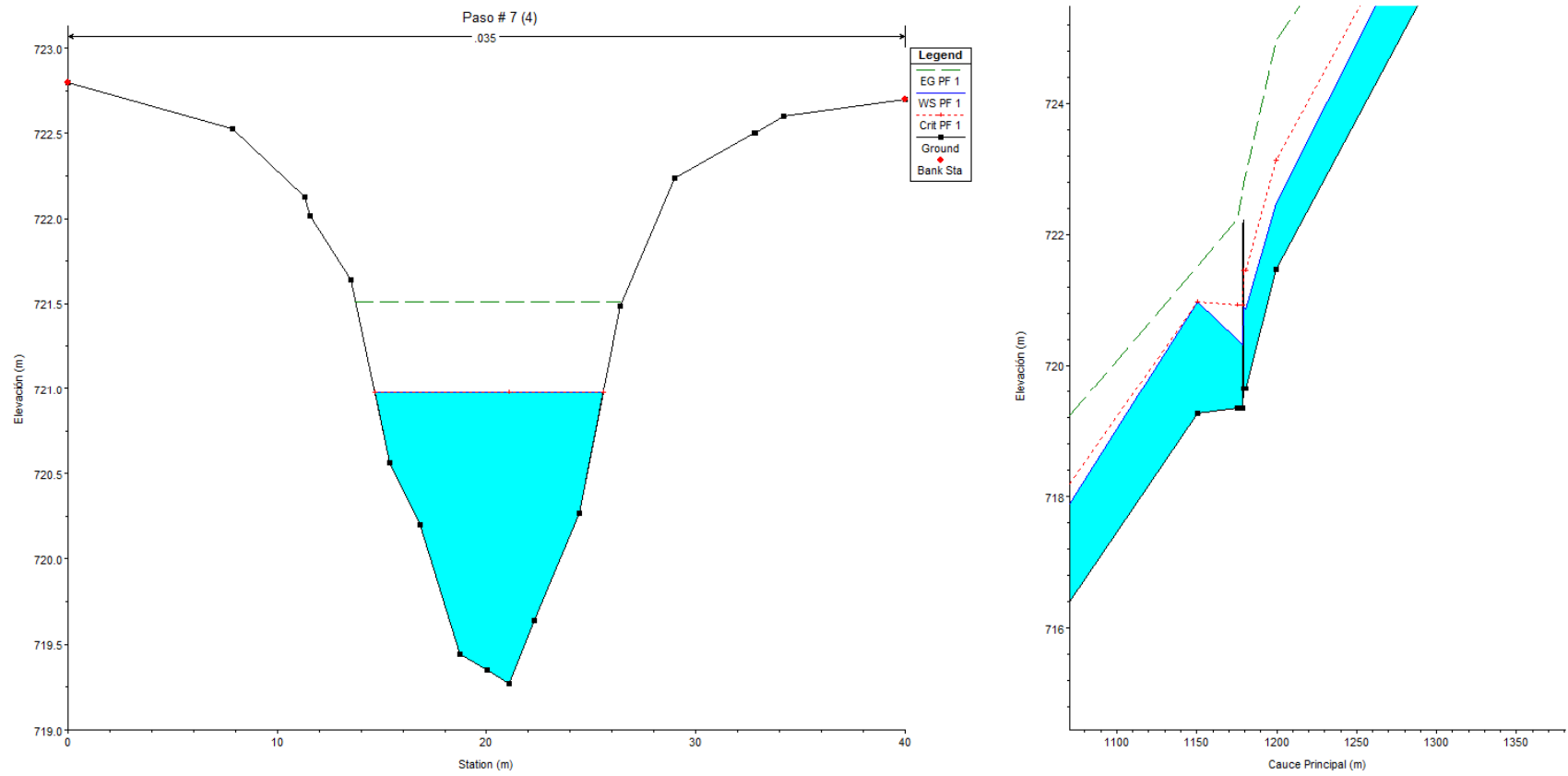
**Figura 106. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 7 (aguas arriba).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



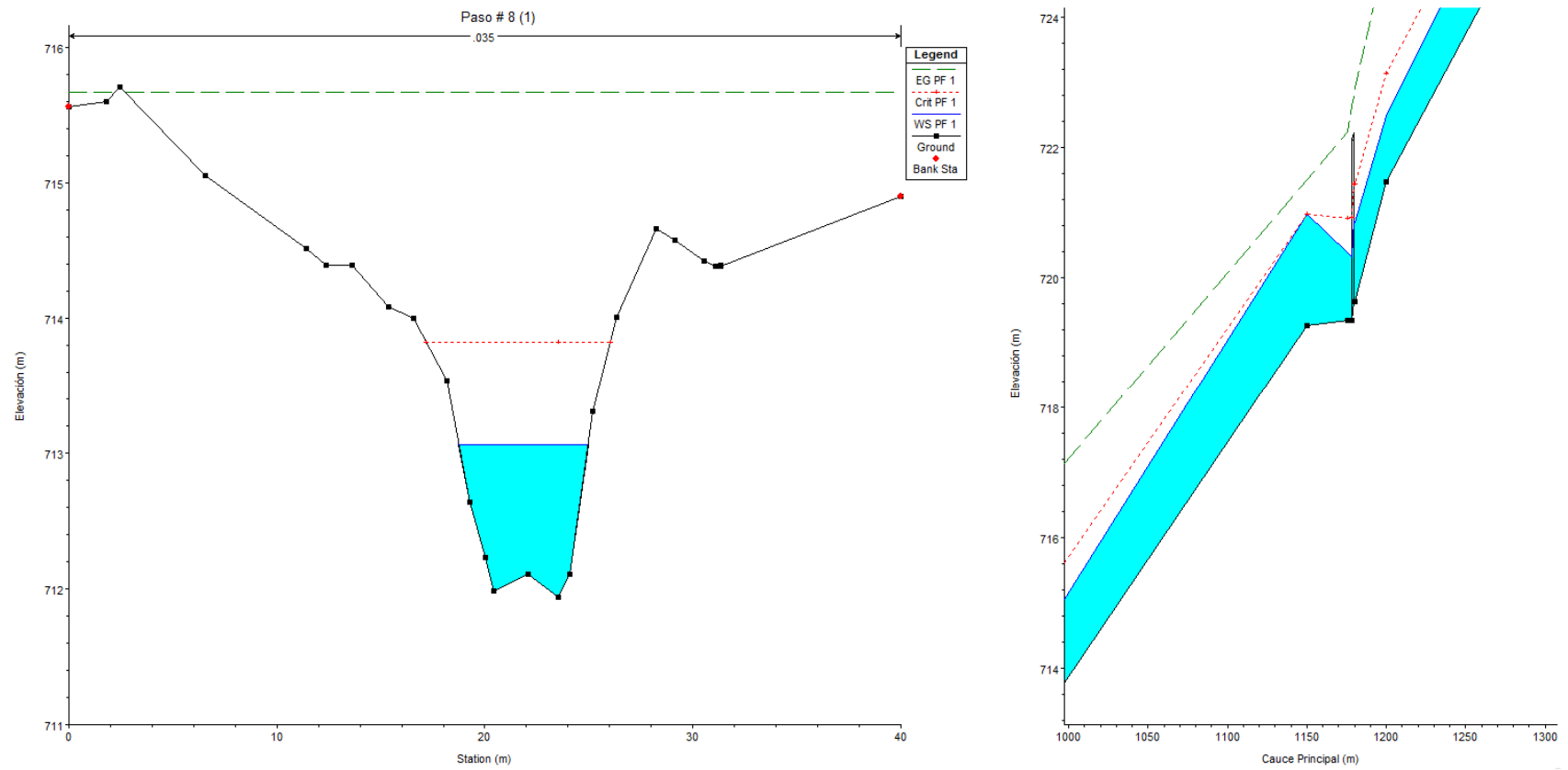
**Figura 107. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 7 (3)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



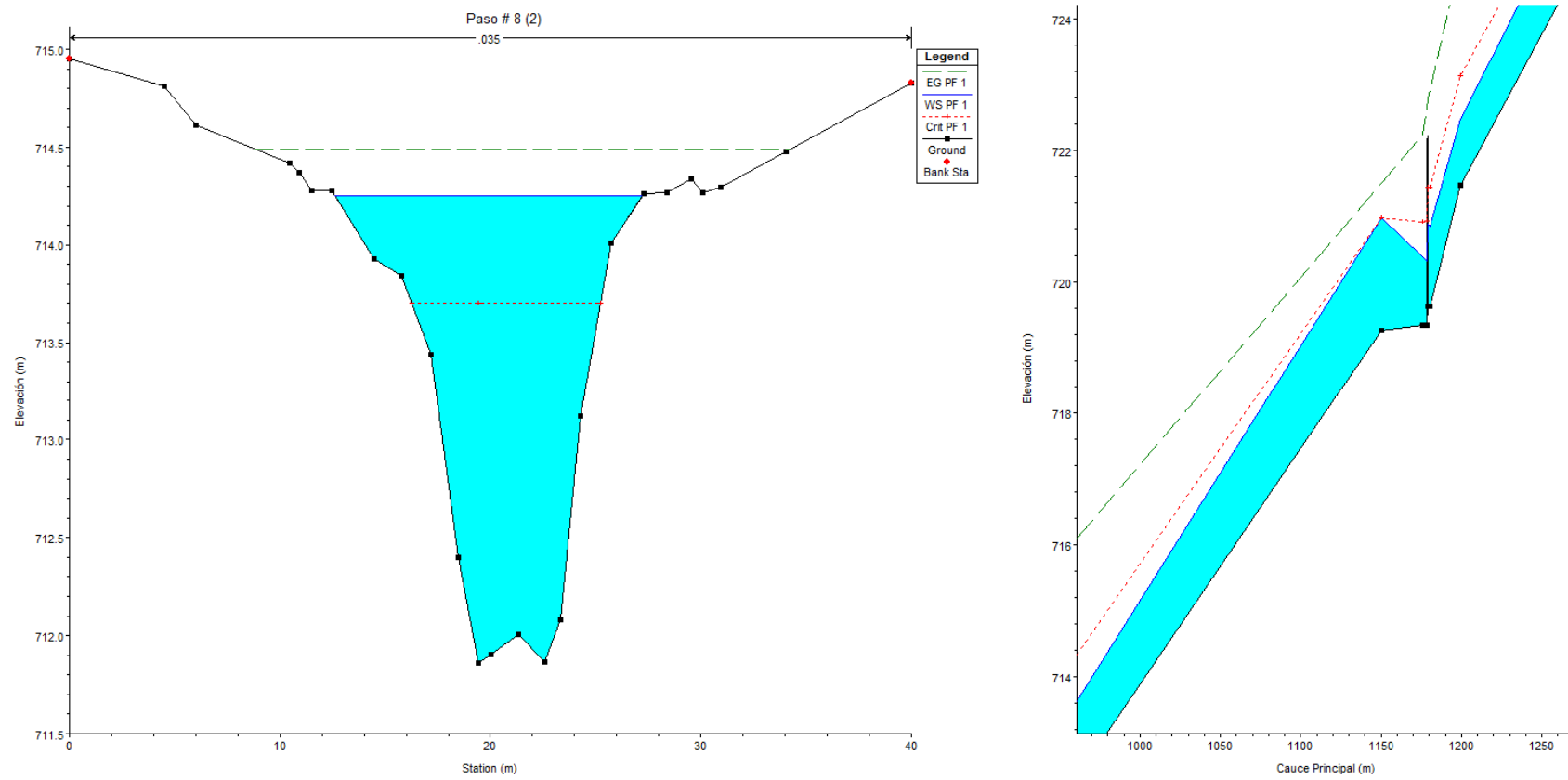
**Figura 108. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 7 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



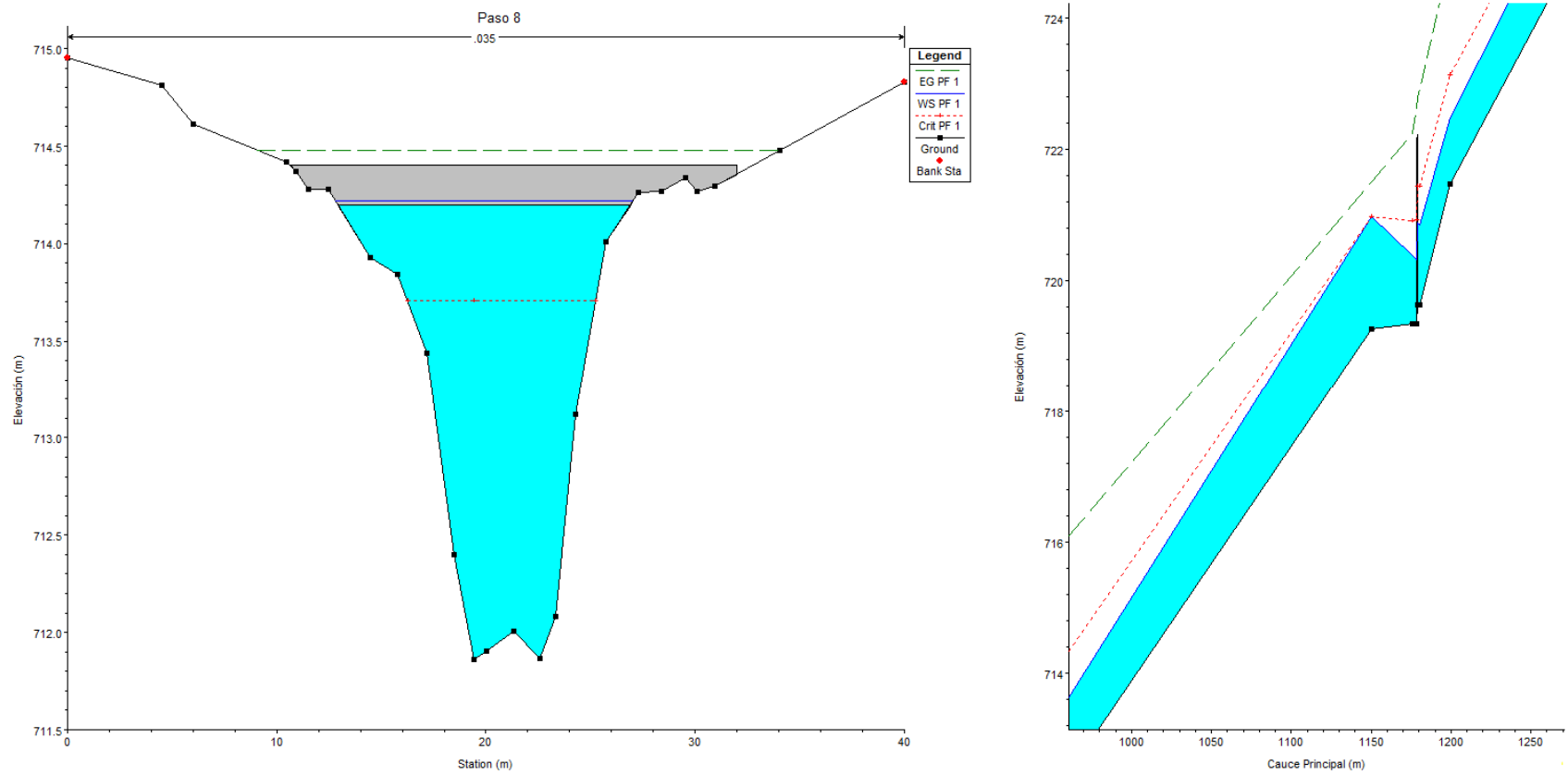
**Figura 109. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 110. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (2)**

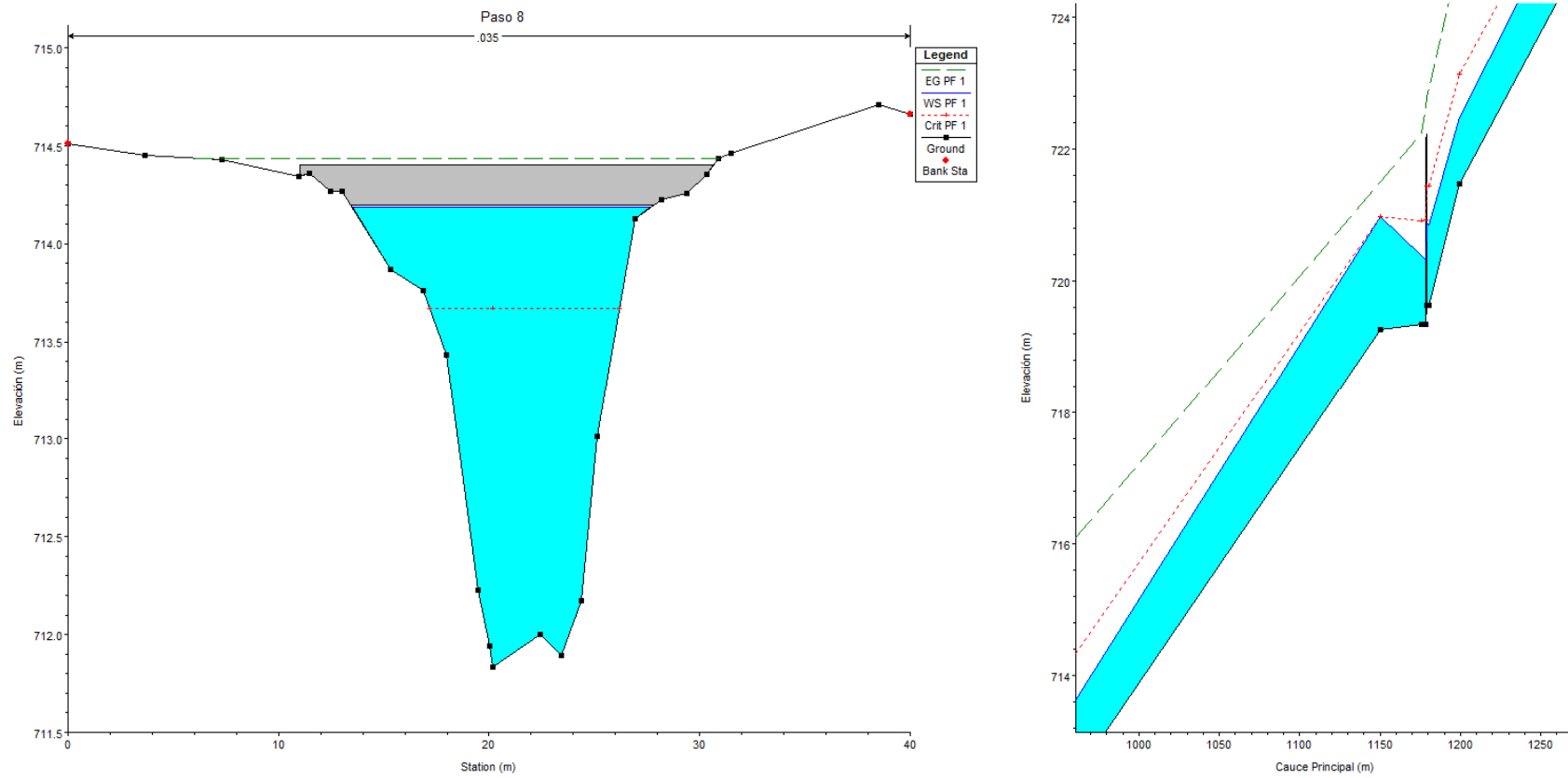
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 111. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 8 (aguas abajo).**

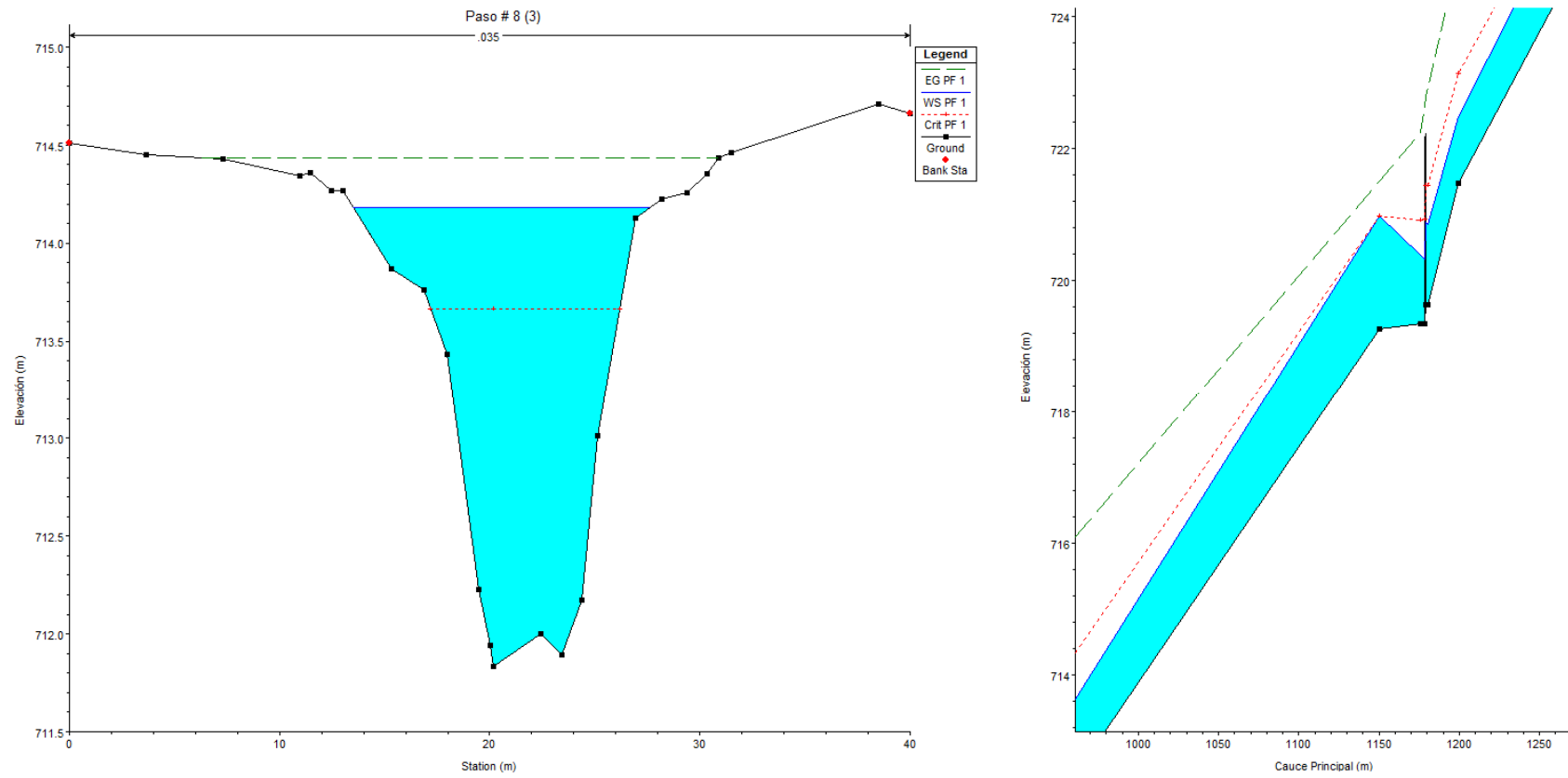


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



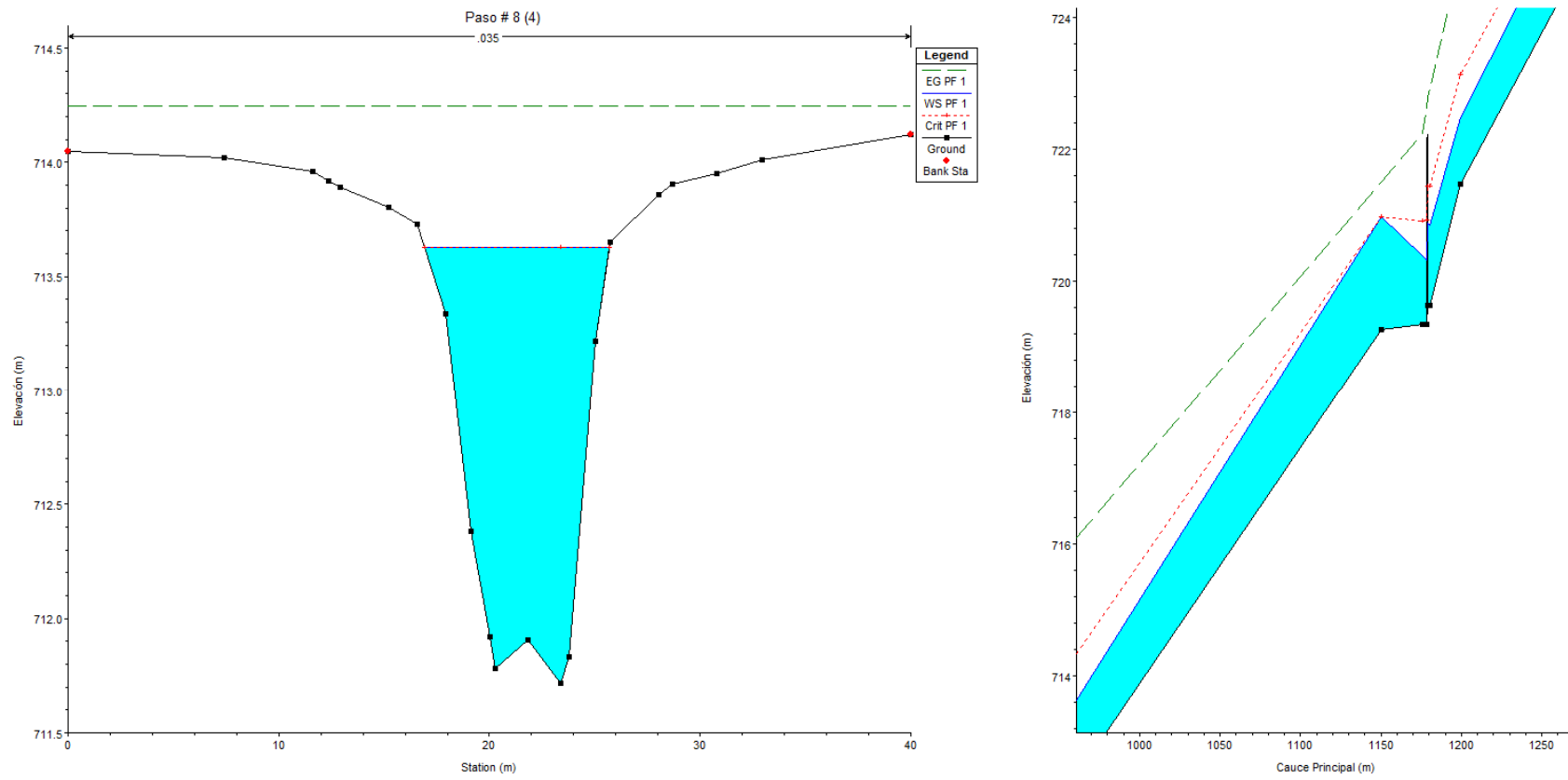
**Figura 112. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 8 (aguas arriba).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



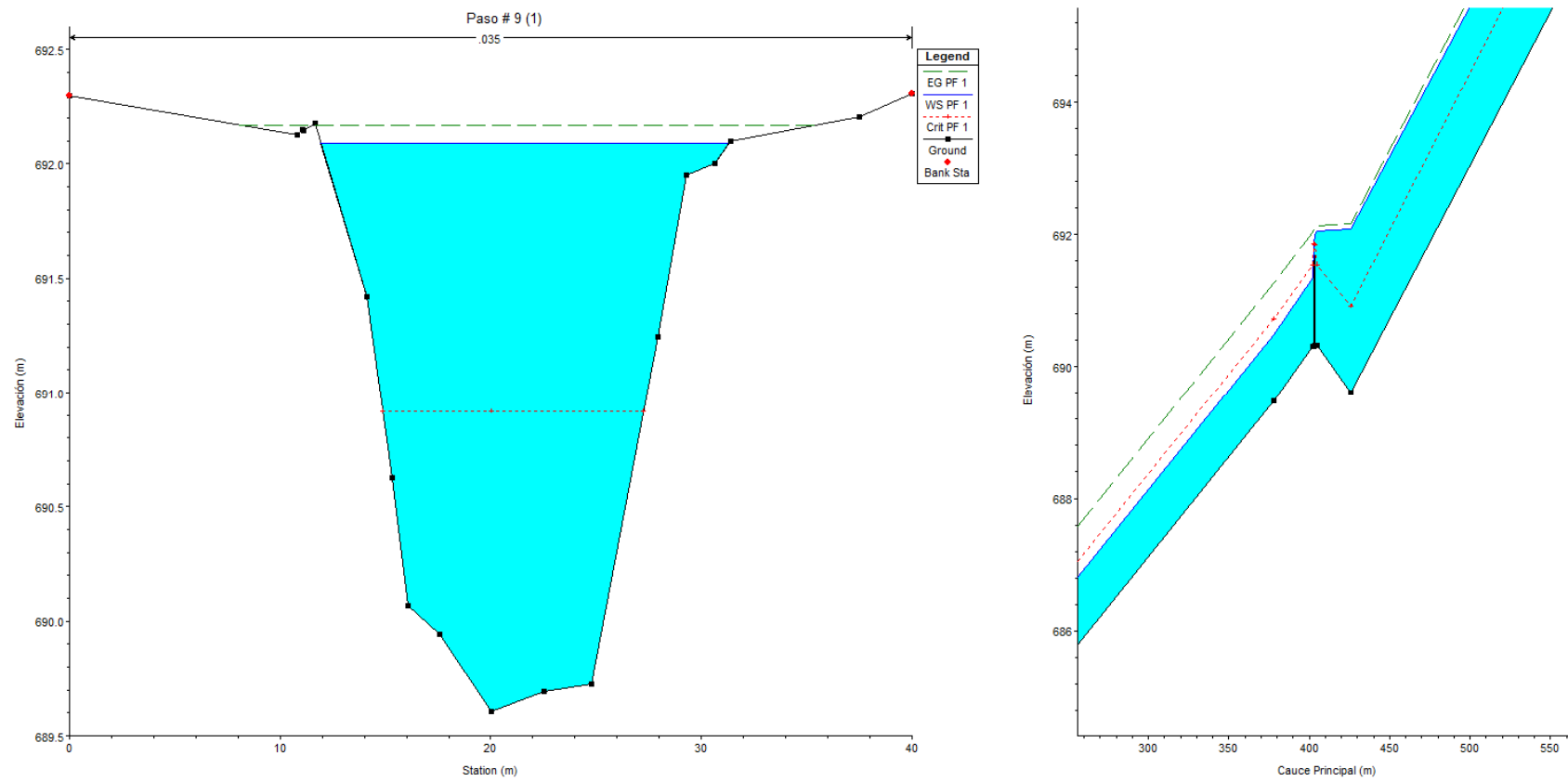
**Figura 113. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (3)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



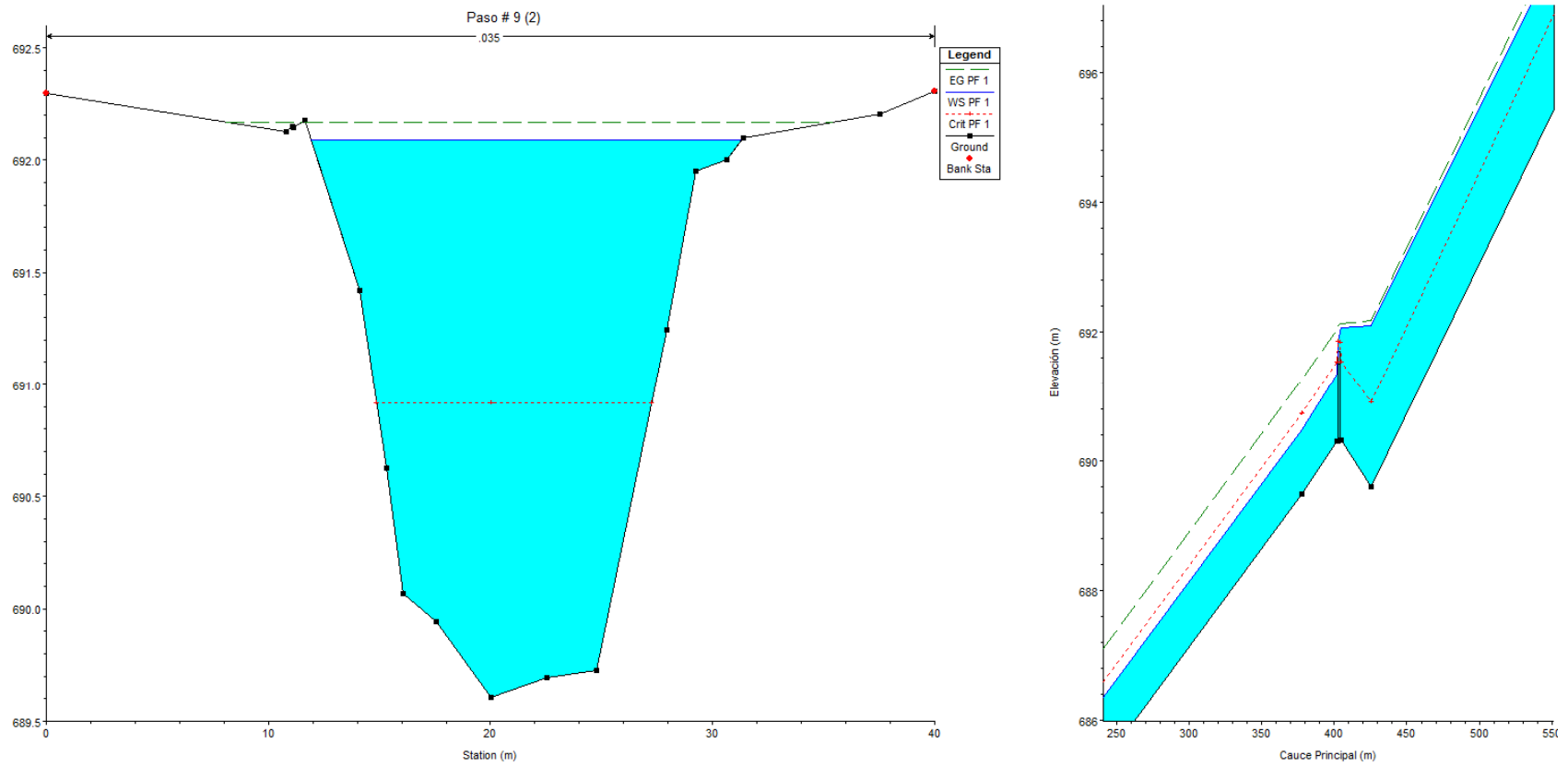
**Figura 114. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 8 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



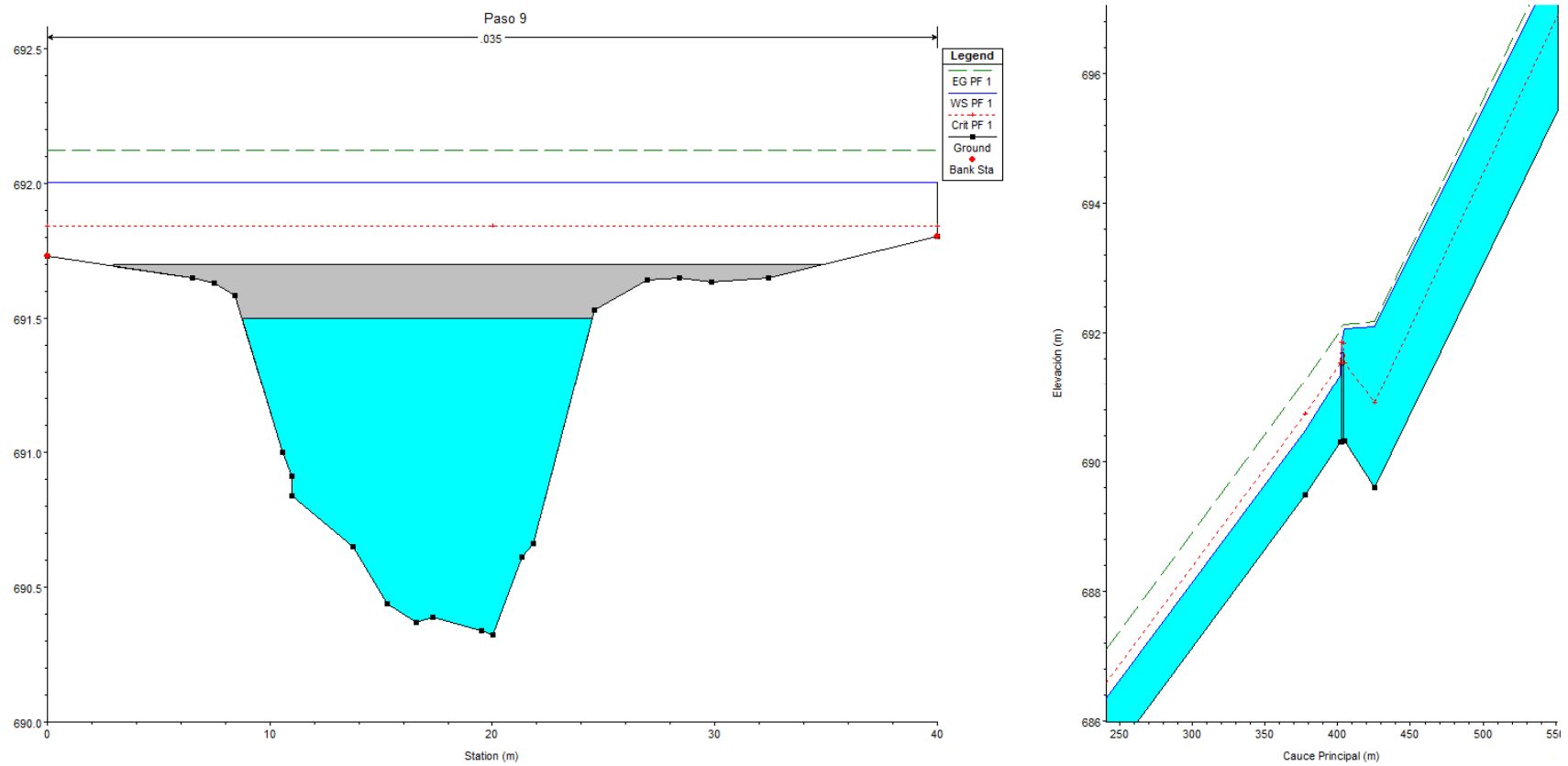
**Figura 115. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 9 (1)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



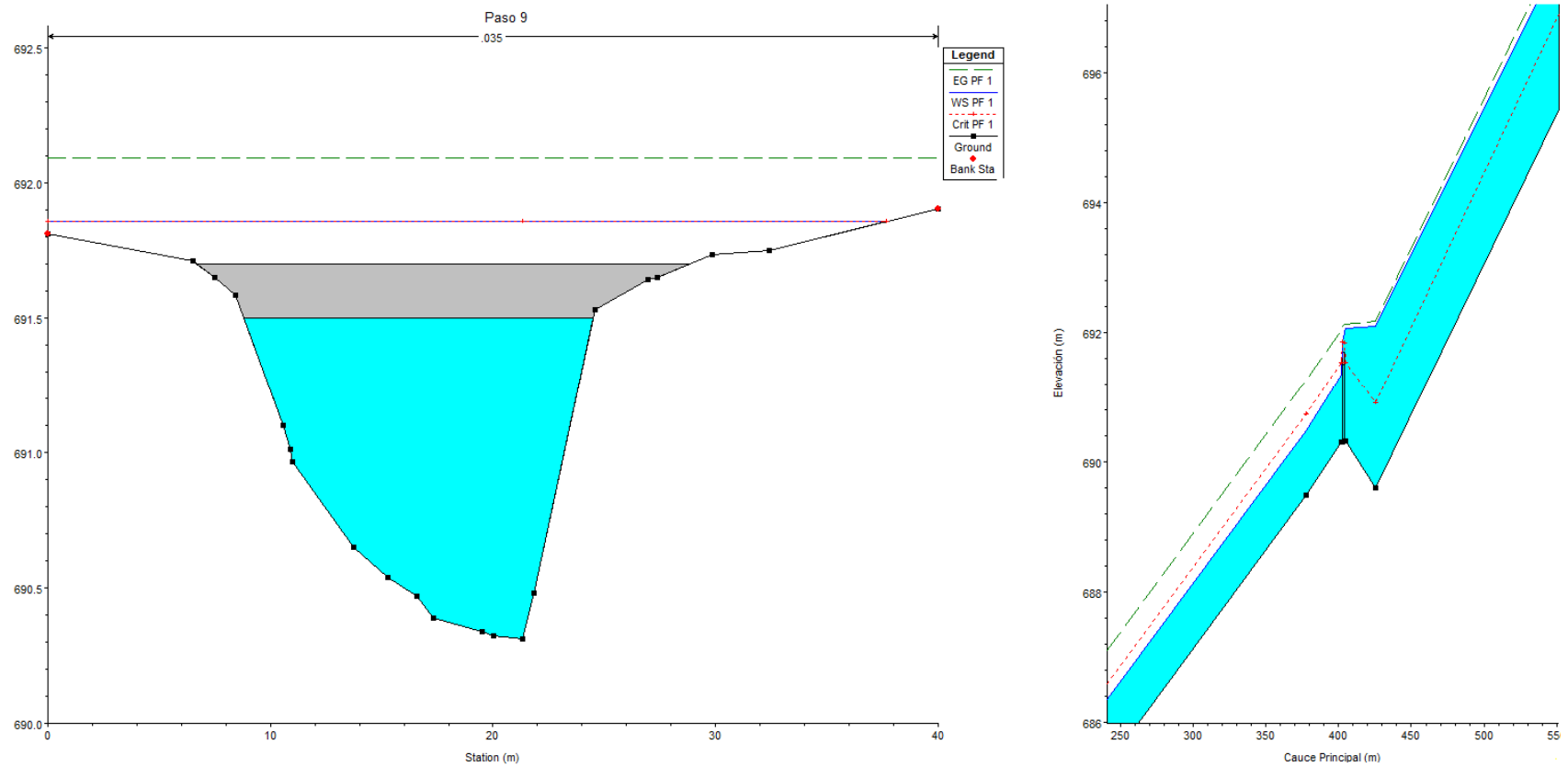
**Figura 116. Nivel de agua calculada para la sección y perfil del paso # 9 (2)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



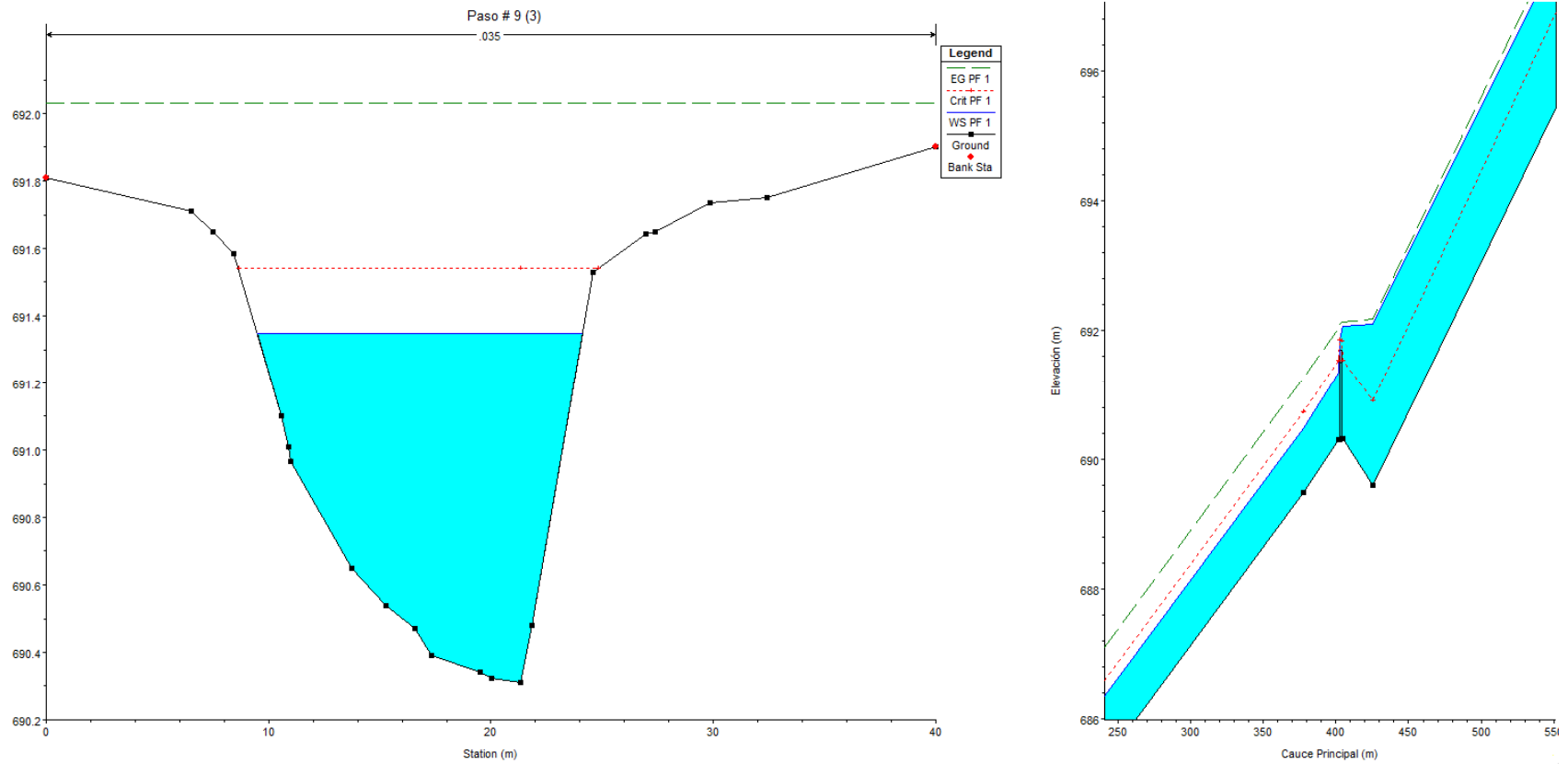
**Figura 117. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 9 (aguas abajo).**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 118. Nivel de agua calculada para la estructura hidráulica # 9 (aguas arriba).**

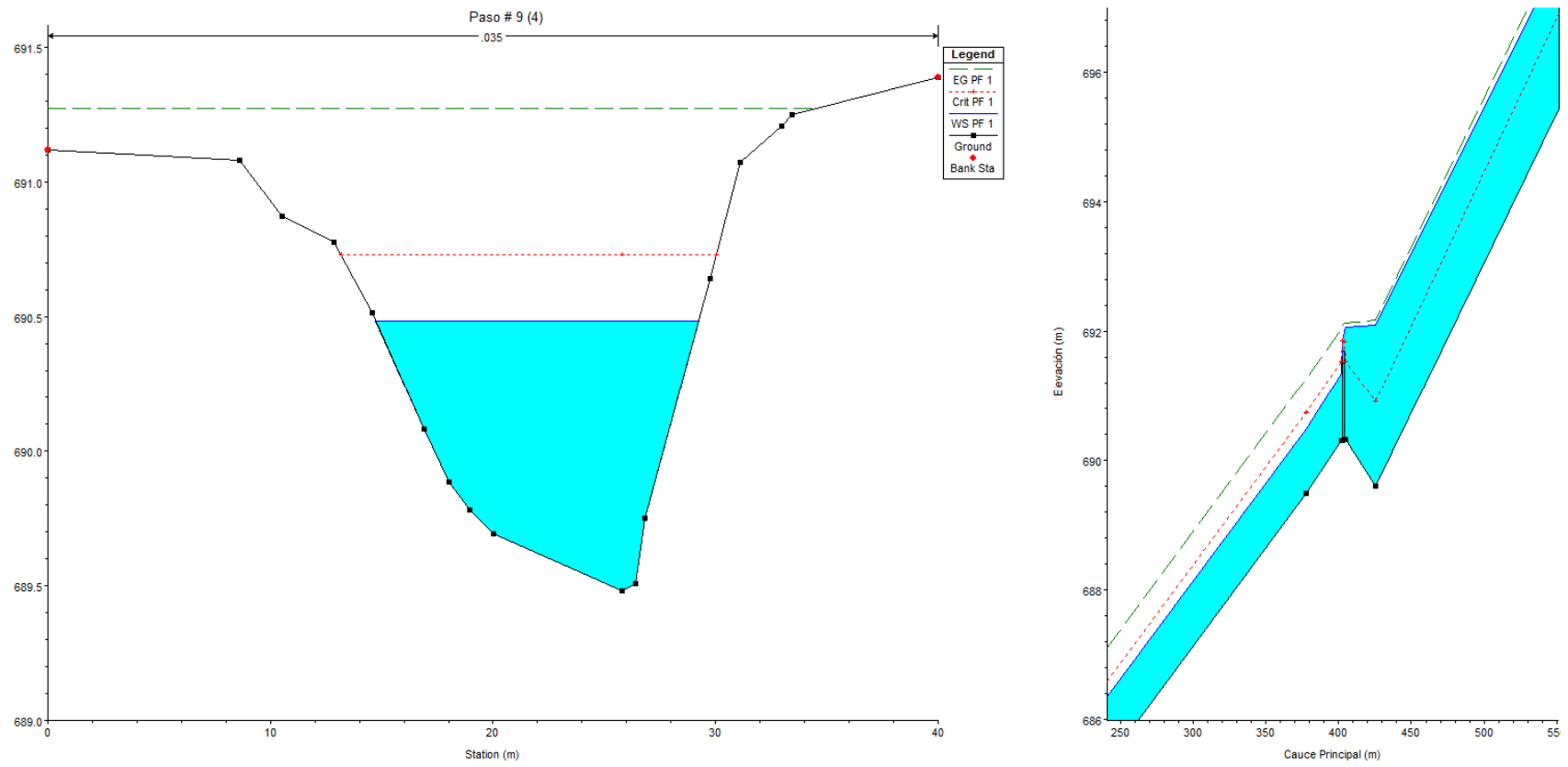
## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 119. Nivel de agua calculada para la sección paso # 9 (3)**

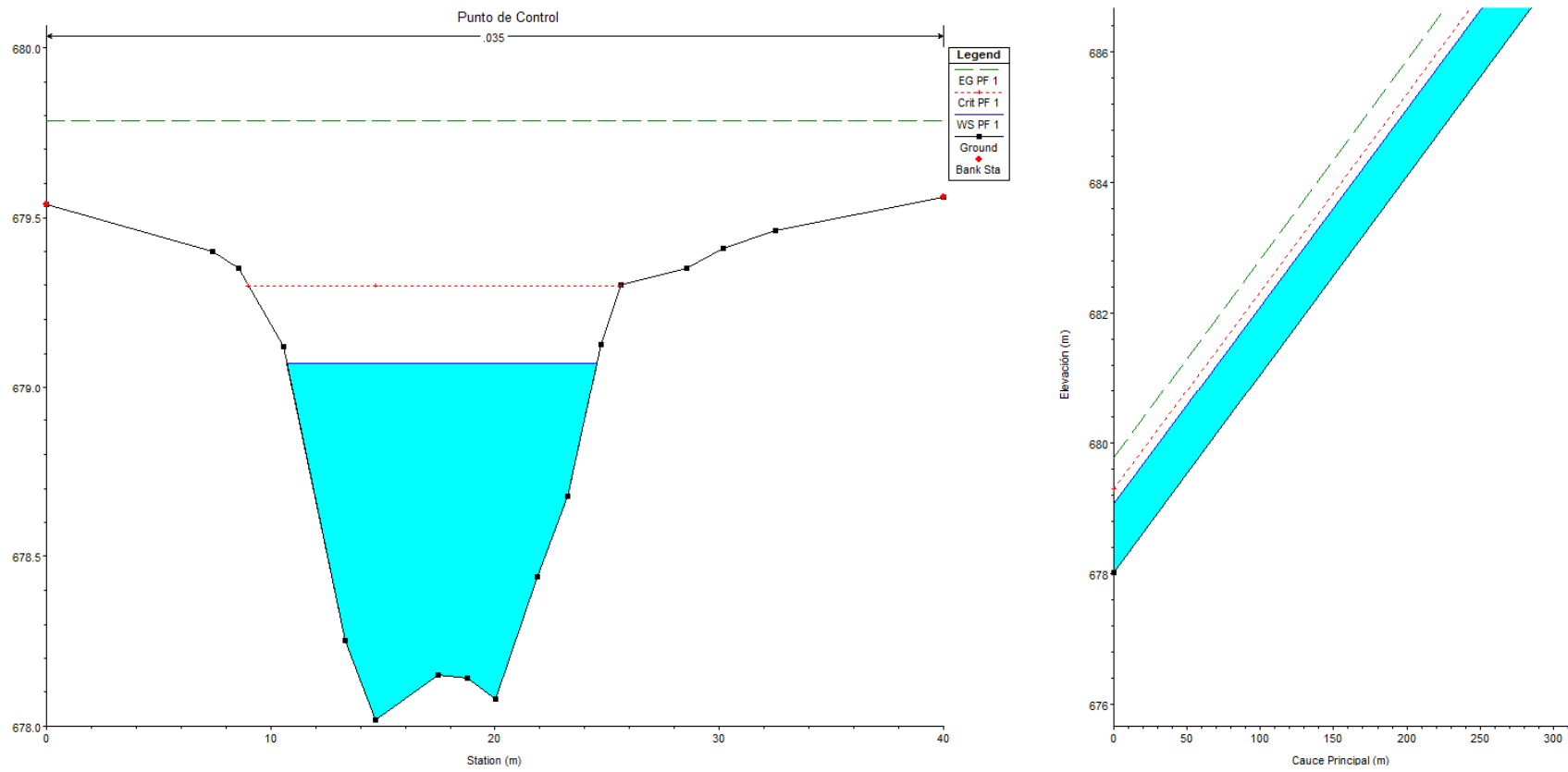


## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



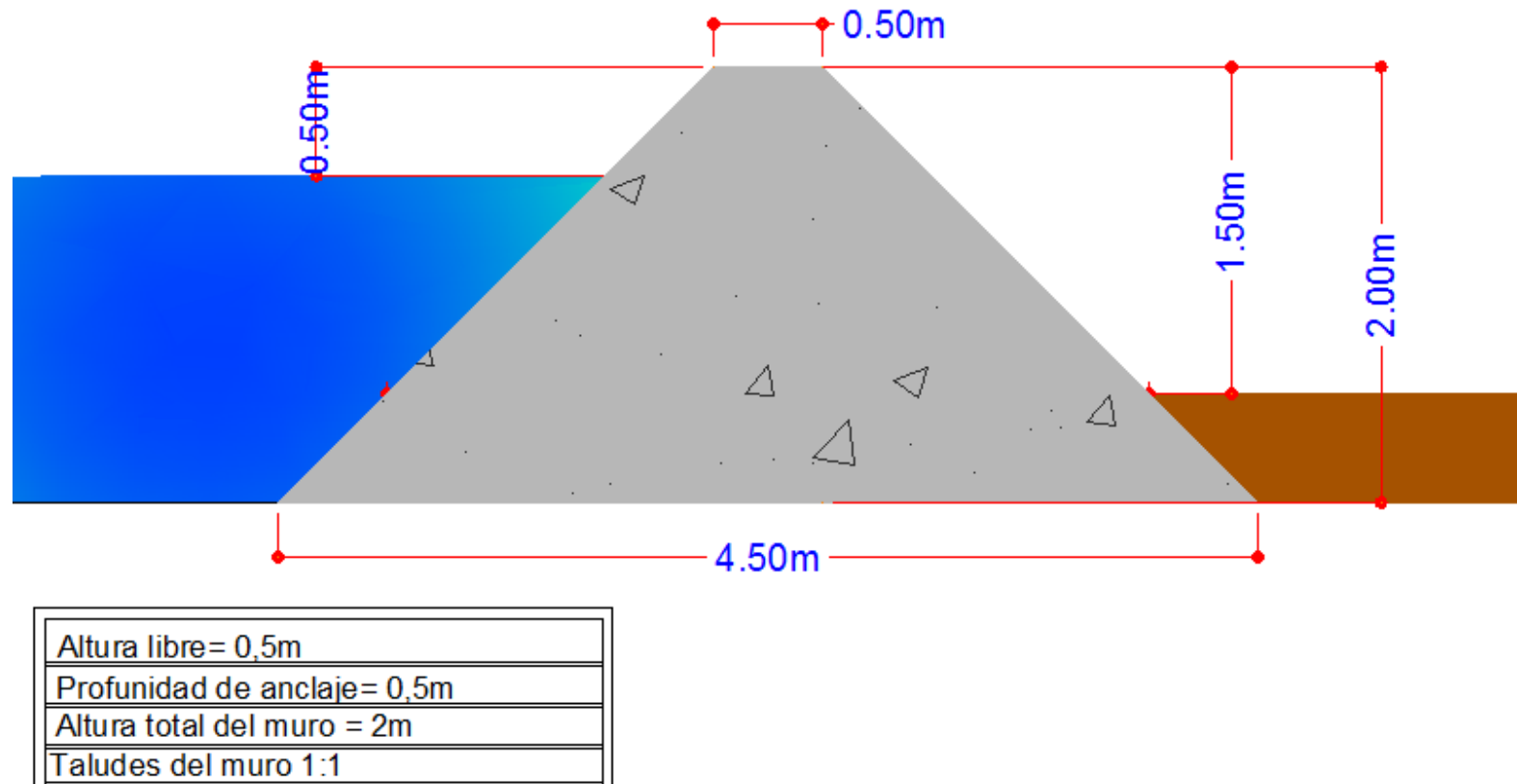
**Figura 120. Nivel de agua calculada para la sección paso # 9 (4)**

## Análisis hidrológico e hidráulico de inundaciones en la Quebrada Valverde



**Figura 121. Nivel de agua calculada para la sección y perfil # 14**

**APÉNDICE C. Diseños preliminares de soluciones estructurales**



**Figura 122. Sección propuesta para el muro dique.**

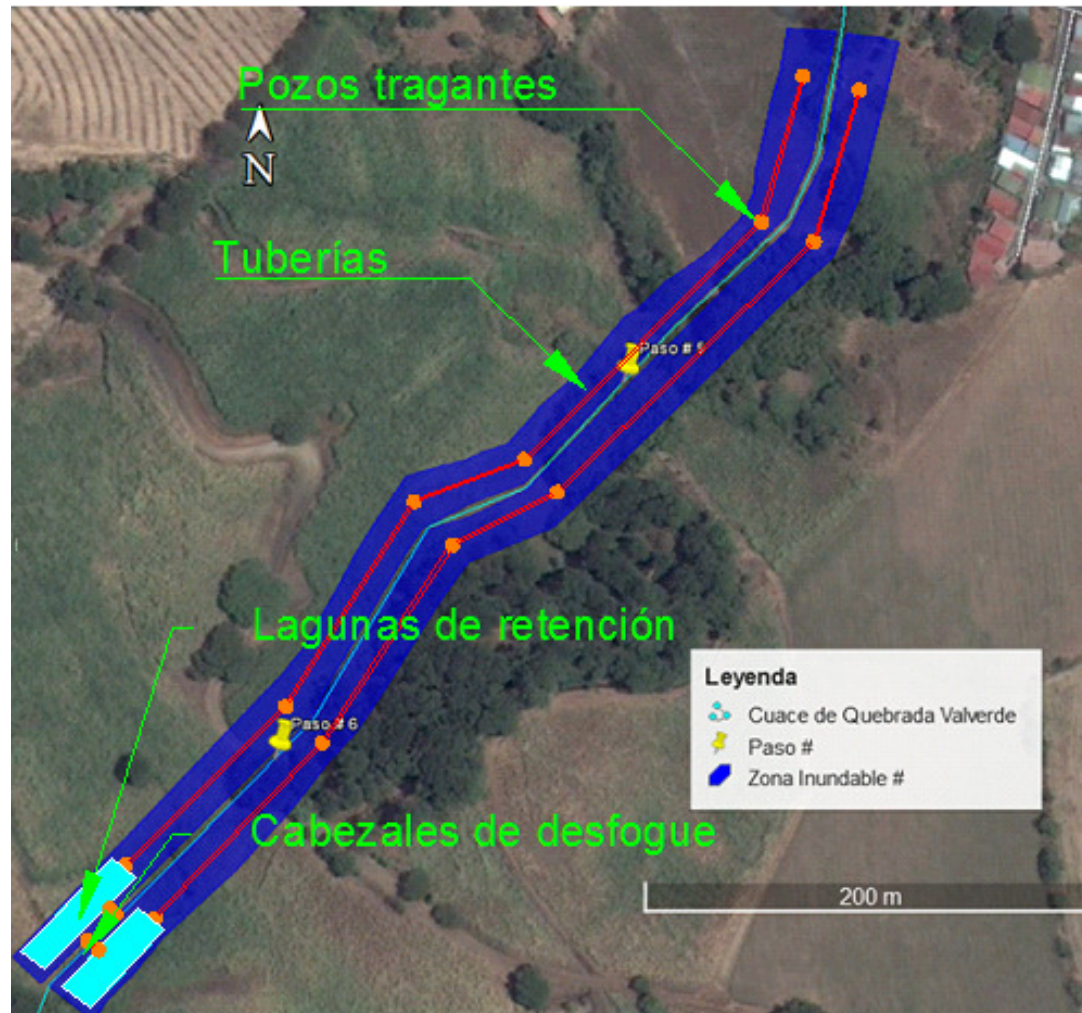


Figura 123. Esquema de sistema de desfogue de aguas pluviales de las zonas inundables.

