



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



## Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

### Modelamiento y simulación de la rotura de una presa mediante la aplicación del software HEC-RAS/HMS

#### **Autores:**

Achiña Campues Anthony Ivan  
Fuentes Mejía Priscila Alejandra  
Quinde Lalvay Alexander Javier

#### **Director de Proyecto:**

Ing. Masabanda Caisaguano Marco Vinicio Ph.D

Sangolquí, 25 de febrero de 2026



## TABLA DE CONTENIDO

**1** Generalidades

**2** Objetivos

**3** Metodología

**4** Resultados

**5** Conclusiones

**6** Recomendaciones



ANTECEDENTES

Era una presa de doble curvatura y radio variable de 222 metros de largo por 66 de alto y sujetaba 50 millones de metros cúbicos de agua.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA



JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

- Tipo: Presa arco de hormigón
- Altura: 66 m
- Longitud de coronación: 222 m
- Año de construcción: 1952–1954
- Finalidad: abastecimiento de agua y riego agrícola

OBJETIVOS



Fuente: Torrijos (2022) y documentación histórica sobre la presa de Malpasset.



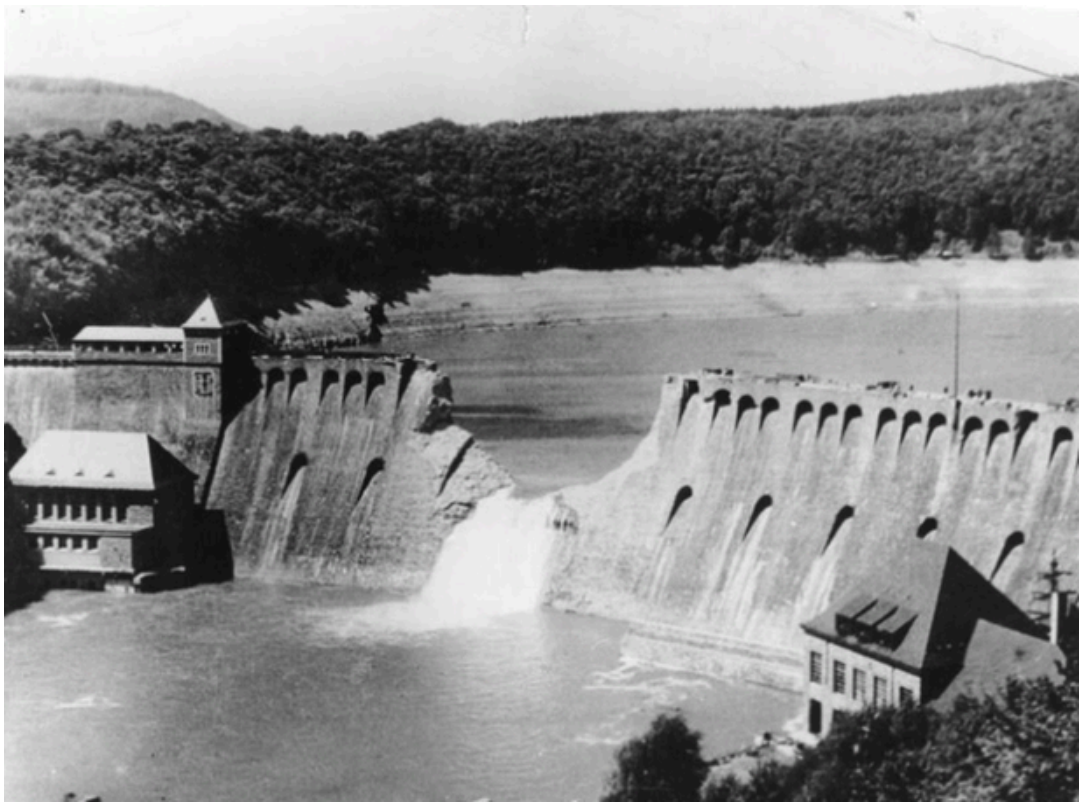
ANTECEDENTES

PLANTEAMIENTO  
DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN E  
IMPORTANCIA

OBJETIVOS

La presa de Banqiao fue una de las mayores catástrofes hidráulicas del siglo XX. Colapsó en agosto de 1975 en China, generando una reacción en cadena que provocó el fallo de decenas de presas (62).



- Tipo: presa de tierra (materiales sueltos)
- Altura: 118 m
- Construcción: década de 1950
- Asistencia técnica inicial de ingenieros soviéticos
- Diseñada para controlar inundaciones y generar riego
- Falla por sobrevertimiento (overtopping)

site.riosycuencas.com — La presa de Banqiao, mayor desastre de infraestructura.



## INTRODUCCIÓN

- Las presas son infraestructuras estratégicas.
- Ante eventos extremos o fallas estructurales pueden generar alto riesgo aguas abajo.
- La gestión preventiva requiere modelación hidrológica e hidráulica.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

## OBJETIVOS

| País                                                                                             | Normativa específica de seguridad de presas                                    | Clasificación por riesgo | Estudios de rotura obligatorios | Plan de emergencia             |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
|  España         | Reglamento Técnico de Seguridad de Presas y Embalses                           | ✓ Sí                     | ✓ Sí                            | ✓ Obligatorio                  |
|  Estados Unidos | Federal Guidelines for Dam Safety (FEMA)                                       | ✓ Sí                     | ✓ Sí                            | ✓ Emergency Action Plan        |
|  Chile        | Reglamento de Seguridad de Presas (MOP)                                        | ✓ Sí                     | ✓ Sí                            | ✓ Obligatorio                  |
|  Brasil       | Política Nacional de Seguridad de Presas                                       | ✓ Sí                     | ✓ Sí                            | ✓ Plan de Acción de Emergencia |
|  Ecuador      | Disposiciones generales (Ley de Recursos Hídricos y Ley de Gestión del Riesgo) | ✗ No específica          | ✗ No sistematizado              | ✗ No obligatorio técnicamente  |



INTRODUCCIÓN

**Comprender el comportamiento del sistema ante eventos extremos**

La simulación hidráulica permite predecir el comportamiento del flujo bajo condiciones normales y extraordinarias, algo que no puede evaluarse únicamente con análisis teóricos estáticos.



PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

**Cuantificar variables críticas para la gestión del riesgo**

Permite determinar caudales máximos, velocidades del flujo y delimitación de áreas inundables, información esencial para identificar zonas vulnerables aguas abajo.



JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

**Sustentar decisiones técnicas**

Permite definir medidas preventivas orientadas a mejorar la seguridad operativa de la presa.

OBJETIVOS





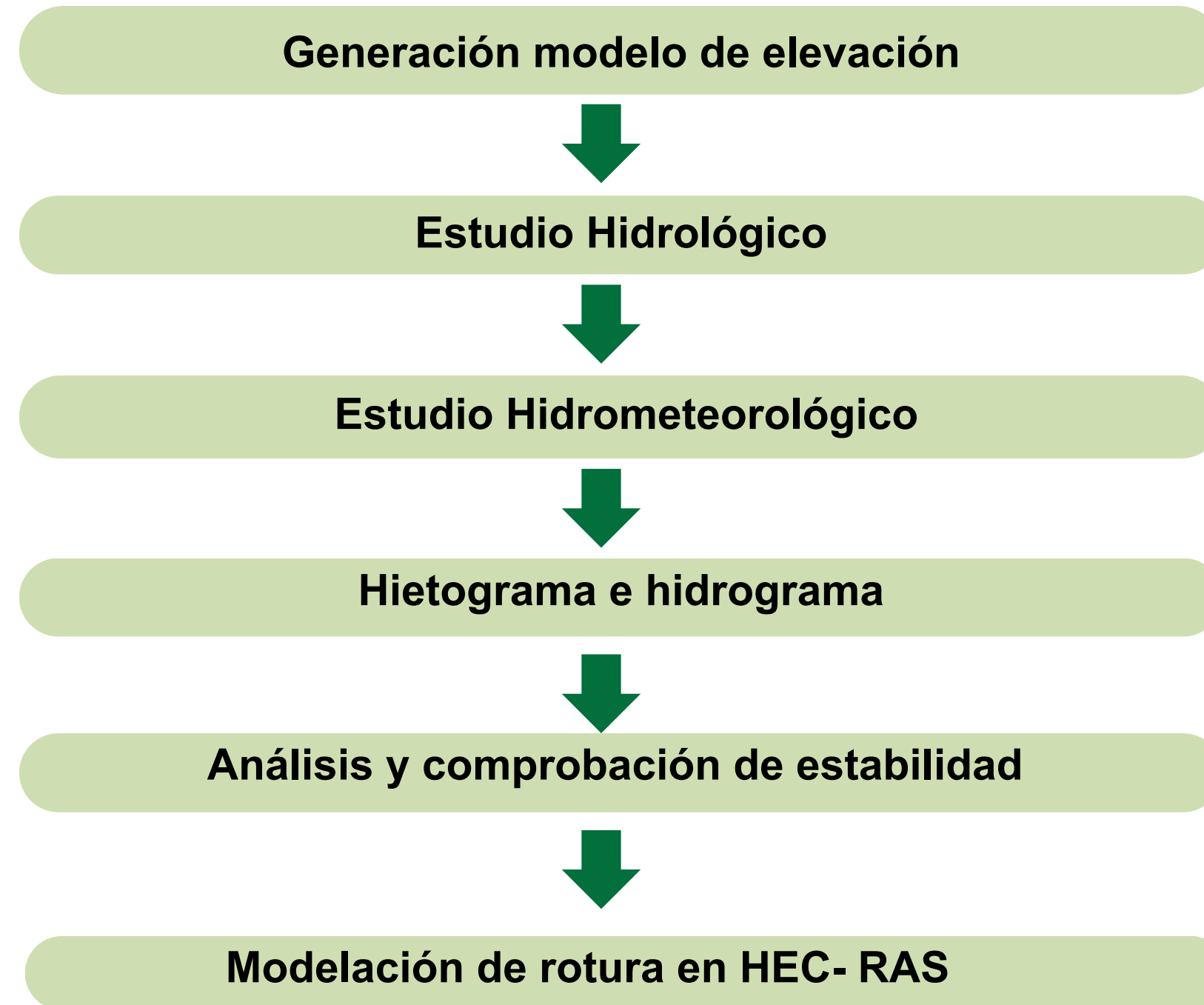
|                             |
|-----------------------------|
| INTRODUCCIÓN                |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA  |
| JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA |
| OBJETIVOS                   |

**OBJETIVO GENERAL**

Simular el comportamiento de la estructura hidráulica de la presa, empleando los modelos HEC-HMS y HEC-RAS, con el fin de analizar los posibles impactos aguas abajo y proponer medidas de mitigación.

- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**
- 1 Realizar el estudio hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Toachi aguas arriba mediante HEC-HMS, considerando lluvias extremas y la operación normal de la presa.
  - 2 Análisis de las fallas estructurales por subpresión en las presas.
  - 3 Simular la rotura de la presa y el flujo resultante con HEC-RAS 2D, utilizando datos de salida del HMS.



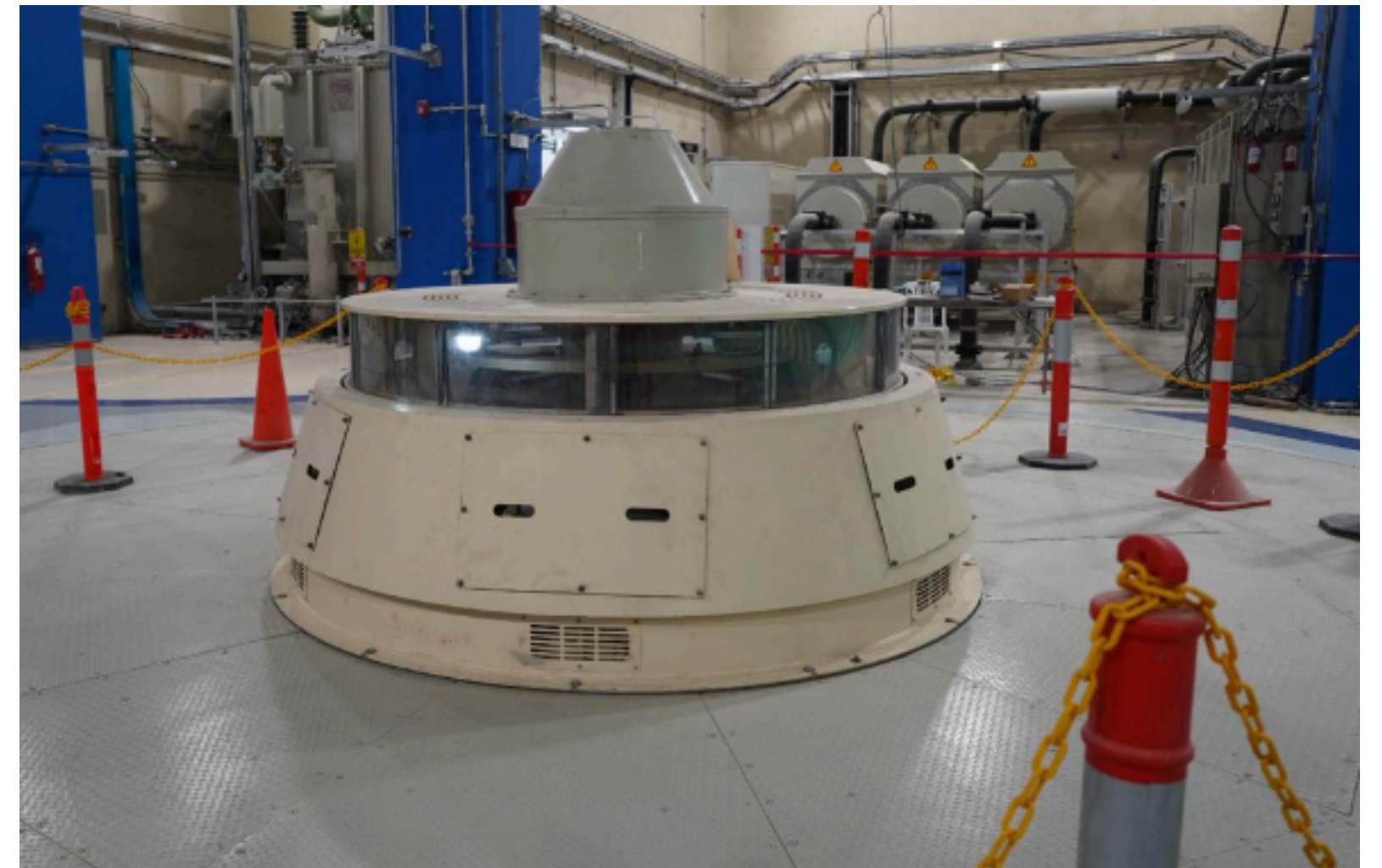






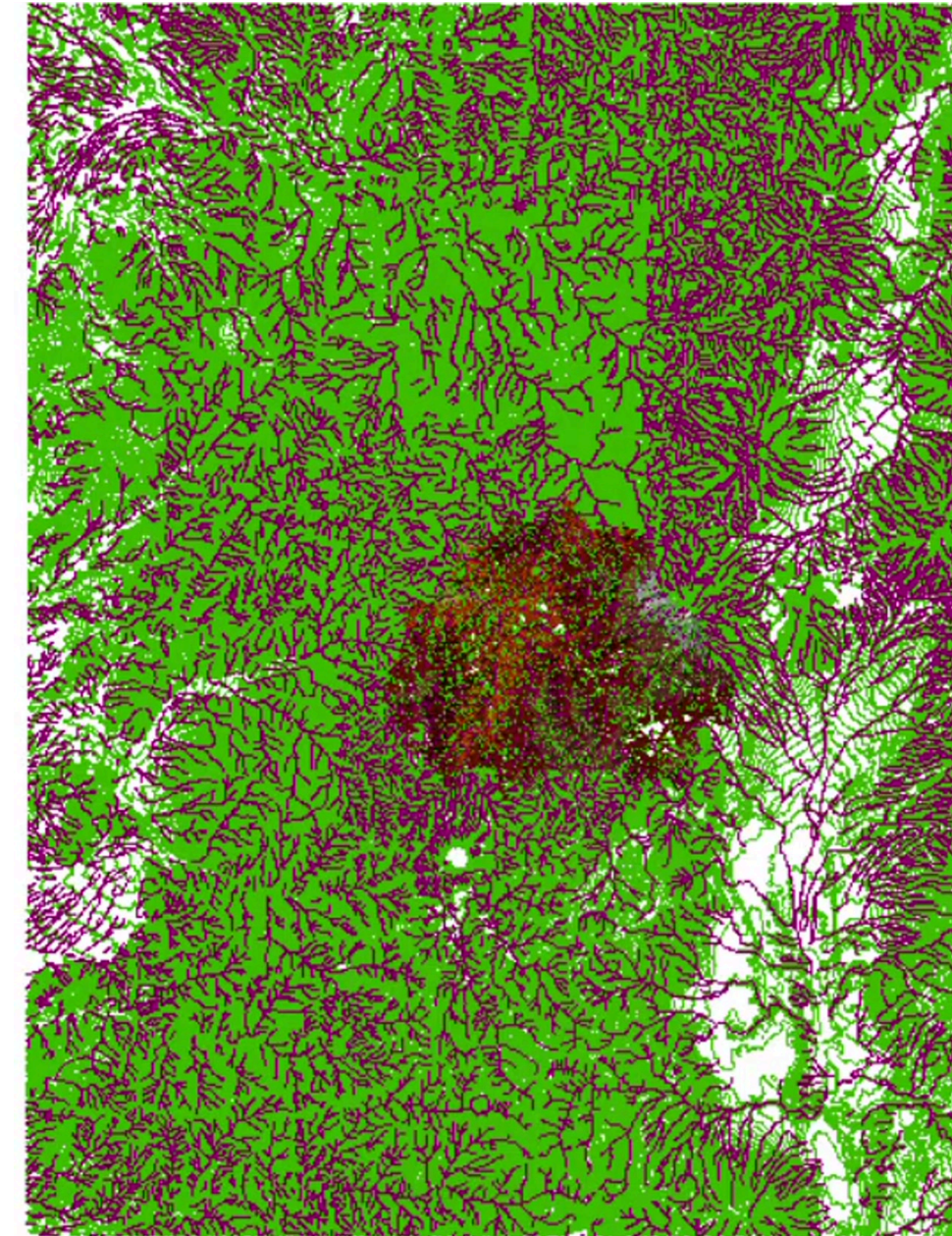
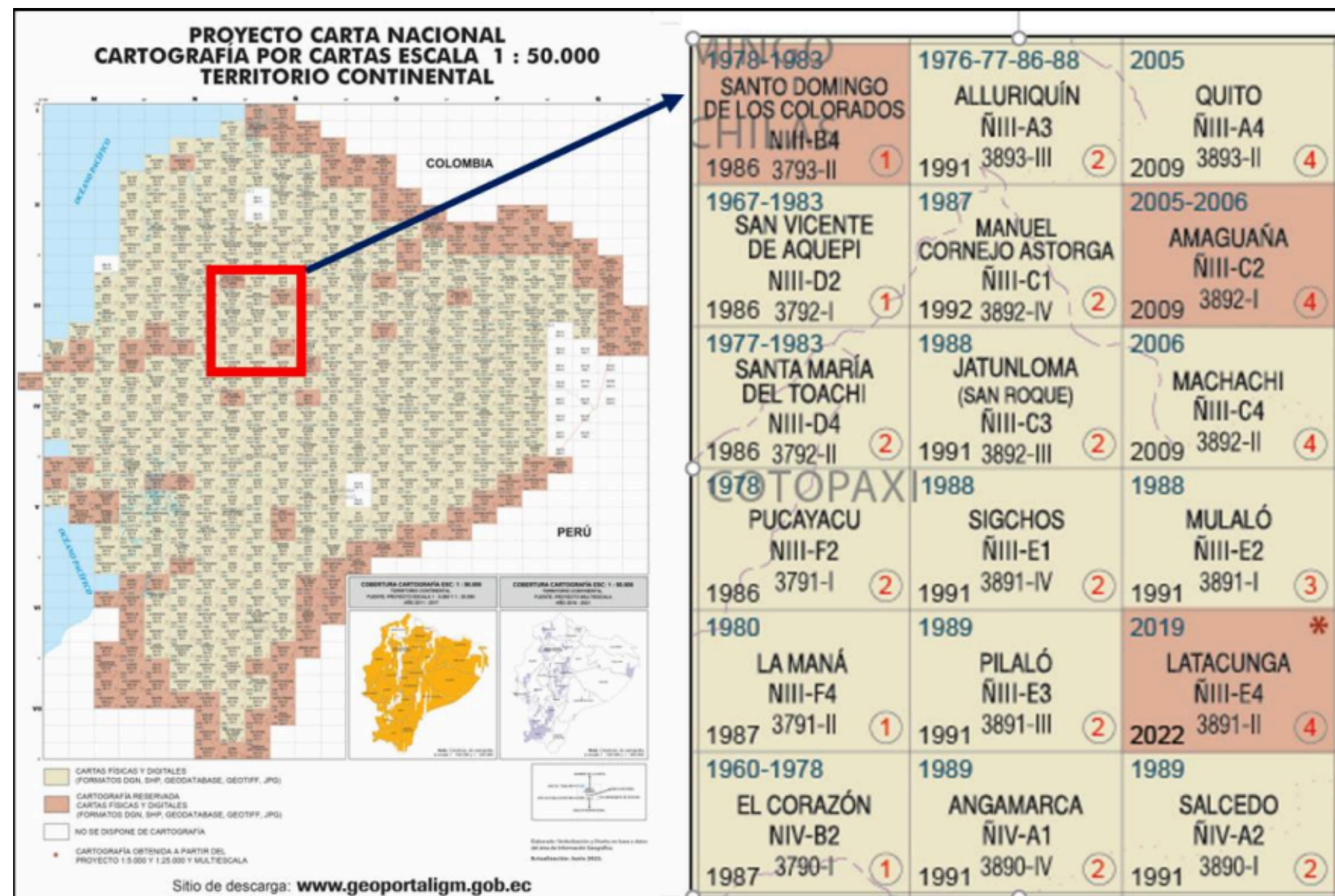
**Coordenadas UTM de la Presa Toachi**  
**Este 731,98    Norte 9'959.340**

- Altitud: Máx 5.160 - Mín 920 msnm.
- Ubicada en las provincias de Cotopaxi, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas
- Río principal: Río Toachi
- Clima: Húmedo tropical andino
- Potencia instalada total del proyecto: 254 MW





Se empleó cartografía oficial del Instituto Geográfico Militar (IGM) a escala 1:50.000 (formato shapefile) como base para la delimitación de la cuenca y la elaboración de los planos de ubicación y estaciones hidrometeorológicas del estudio.

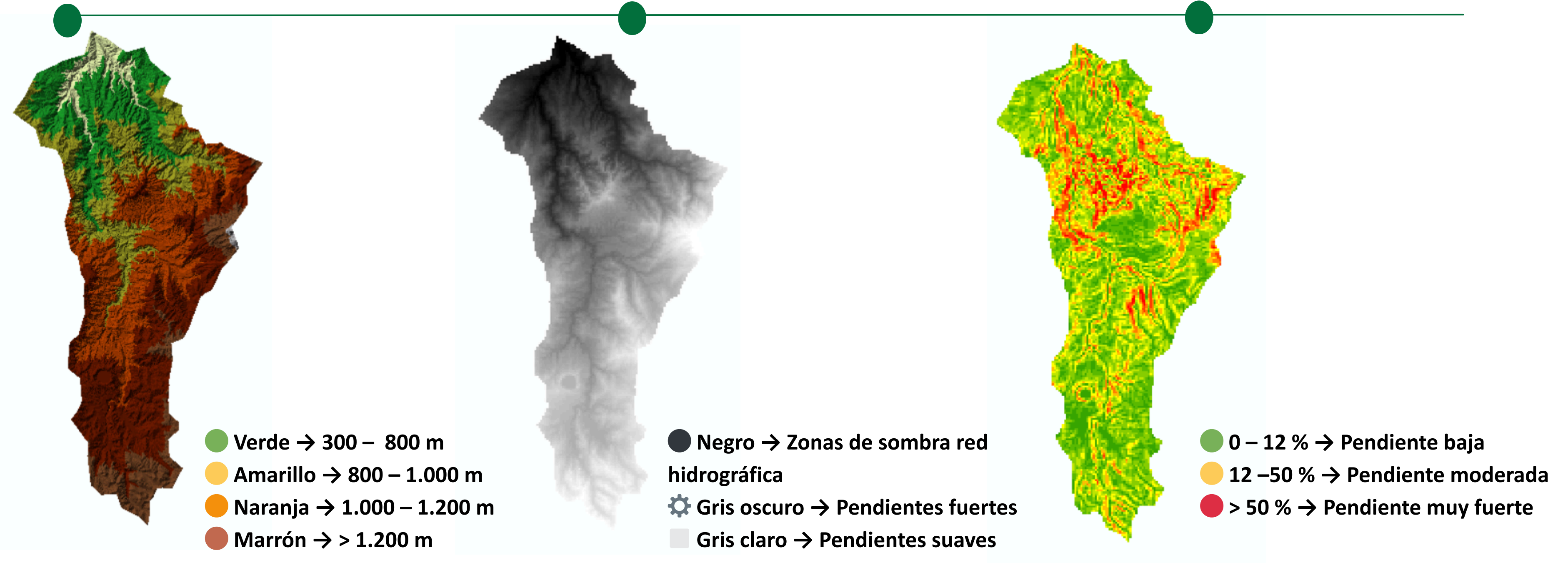




### MDE

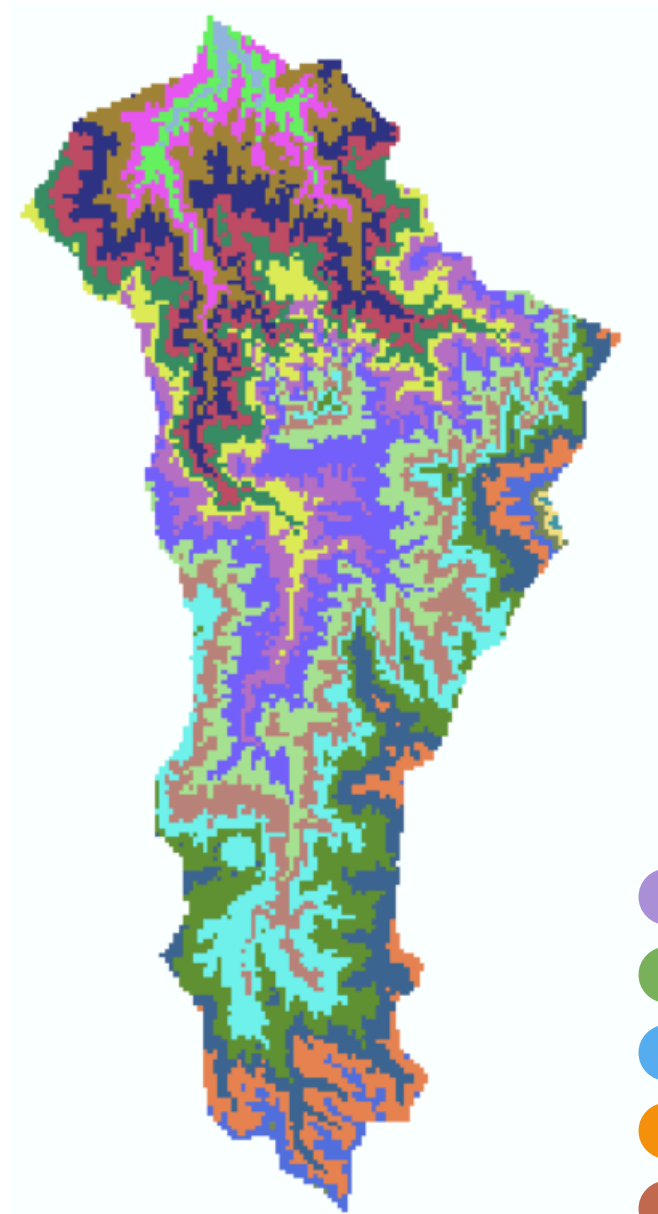
### HILLSHADE

### SLOPE



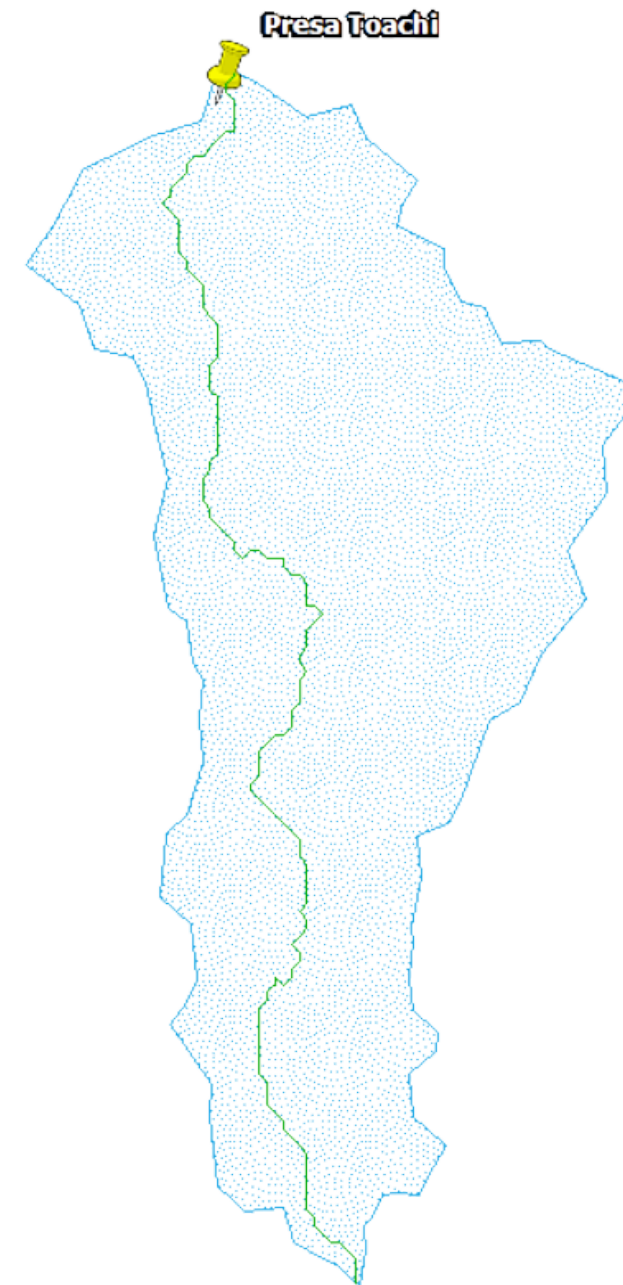


### DEM RECLASS



- Zona alta
- Zona media alta
- Zona media
- Zona media baja
- Zona baja

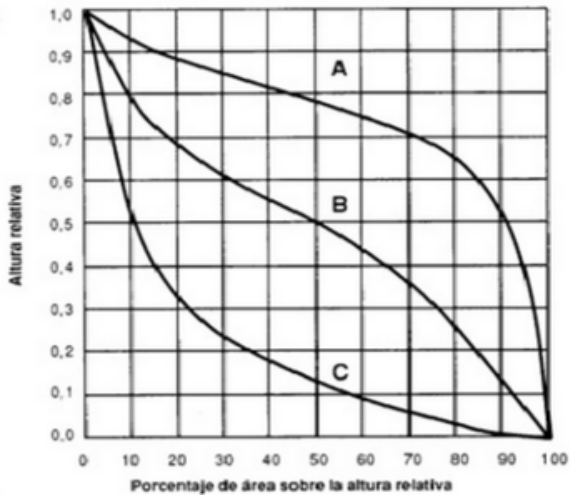
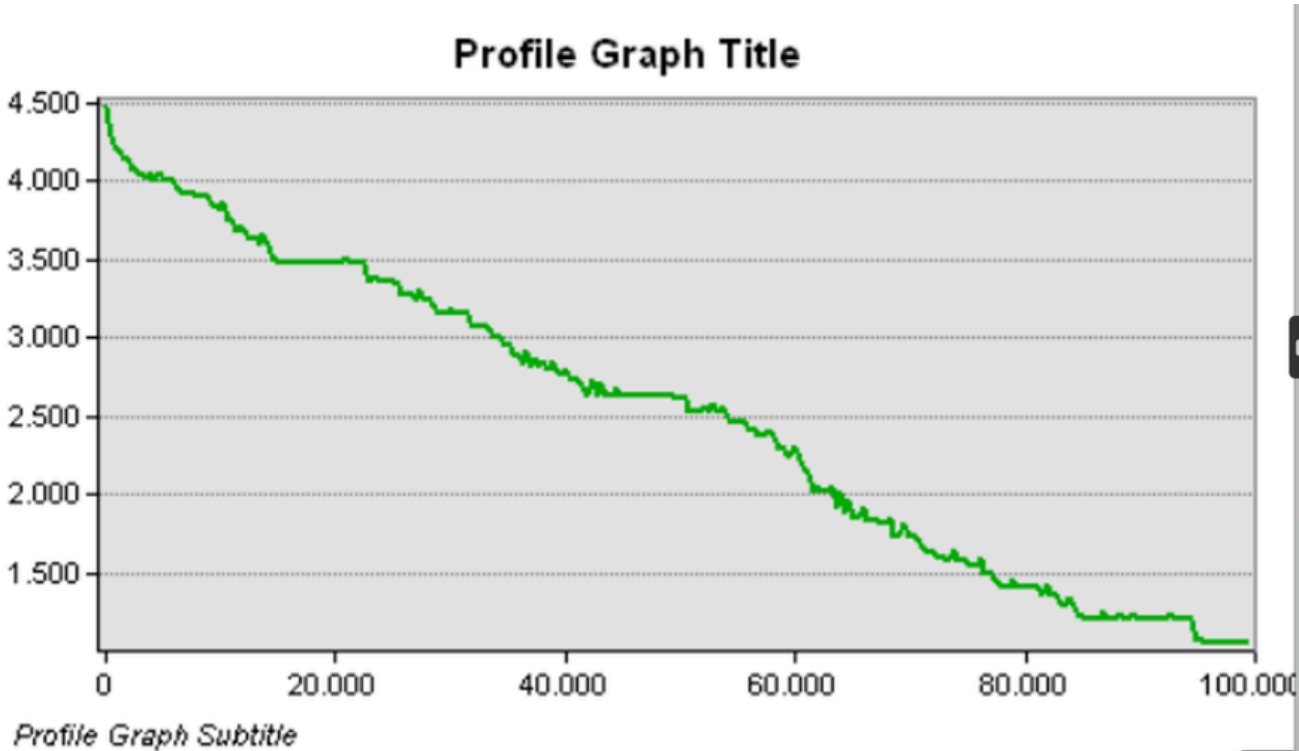
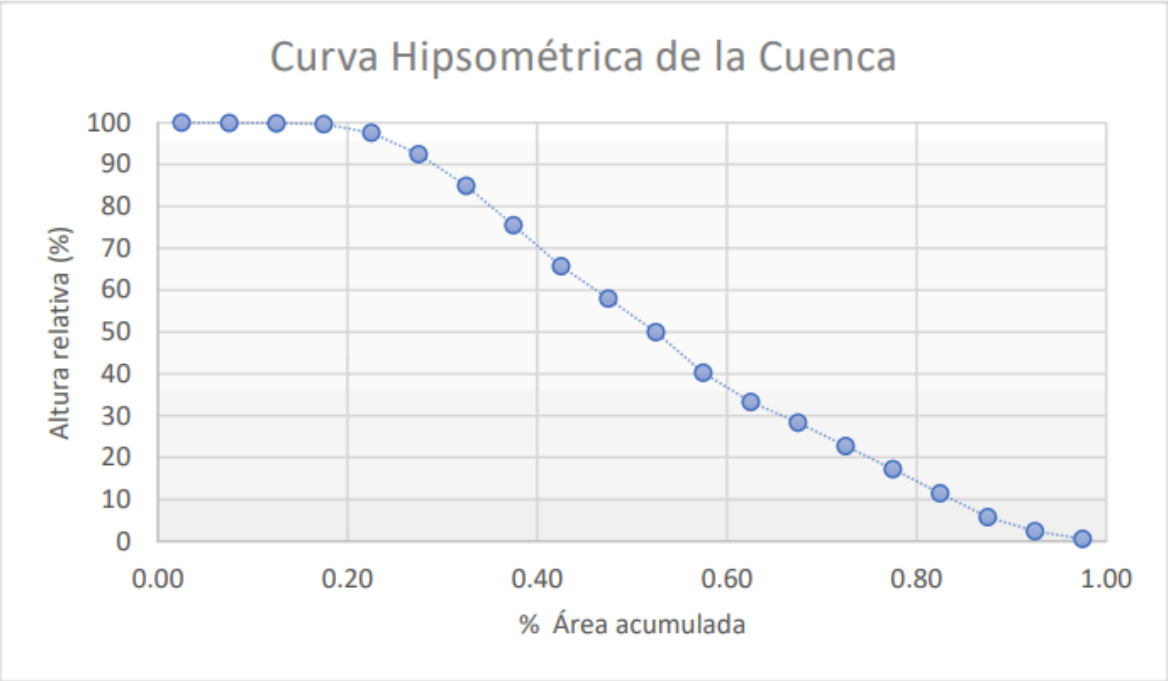
### LONGEST FLOW PATH



- Línea verde → Trayectoria principal del flujo
- ◆ Fondo punteado → Área de la Cuenca
- ◆ Punto de Cierre → Salida de la cuenca



| Punto de Análisis Cierre | Área  | Perímetro | LC    | Kc   | CN |
|--------------------------|-------|-----------|-------|------|----|
|                          | km2   | km        | km    |      |    |
| Presa Toachi             | 1.476 | 209,812   | 99,33 | 1,53 | 76 |

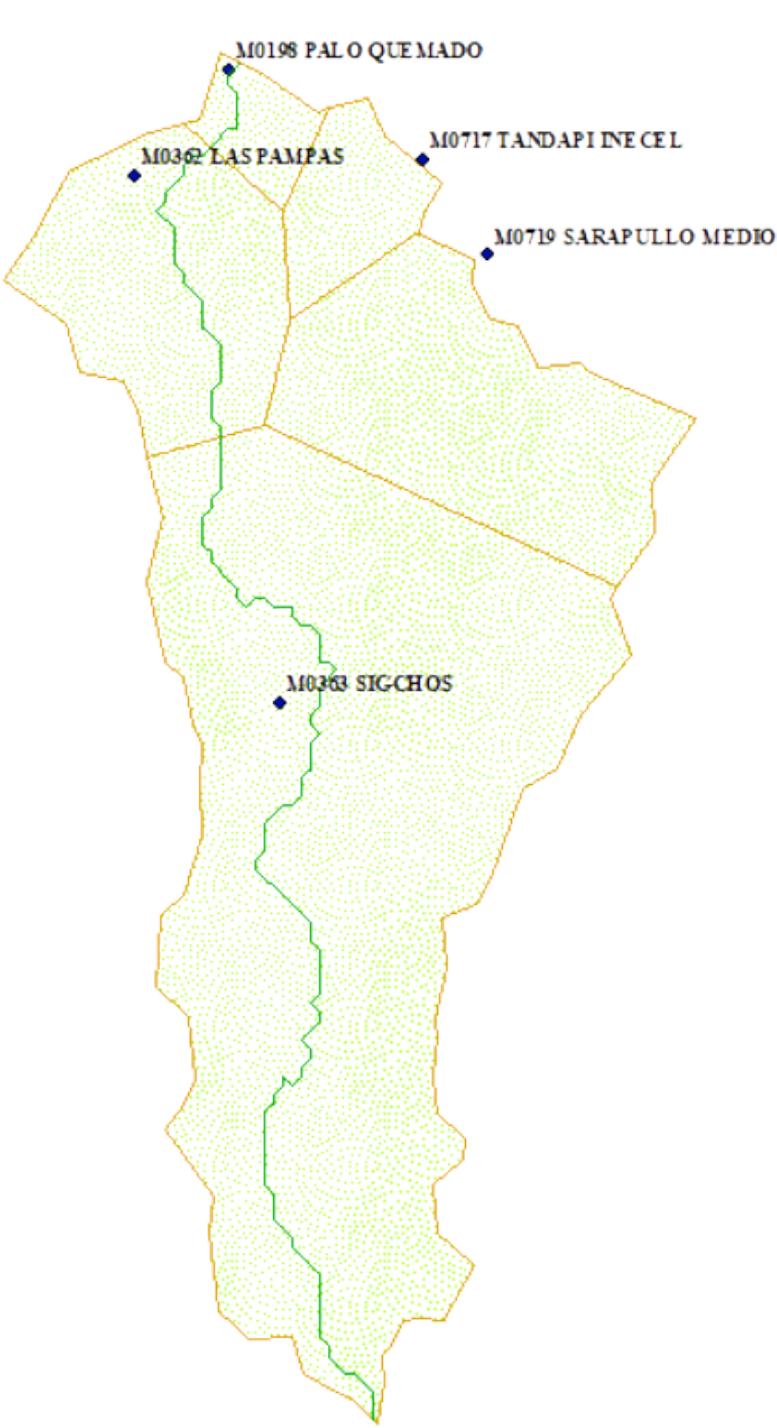
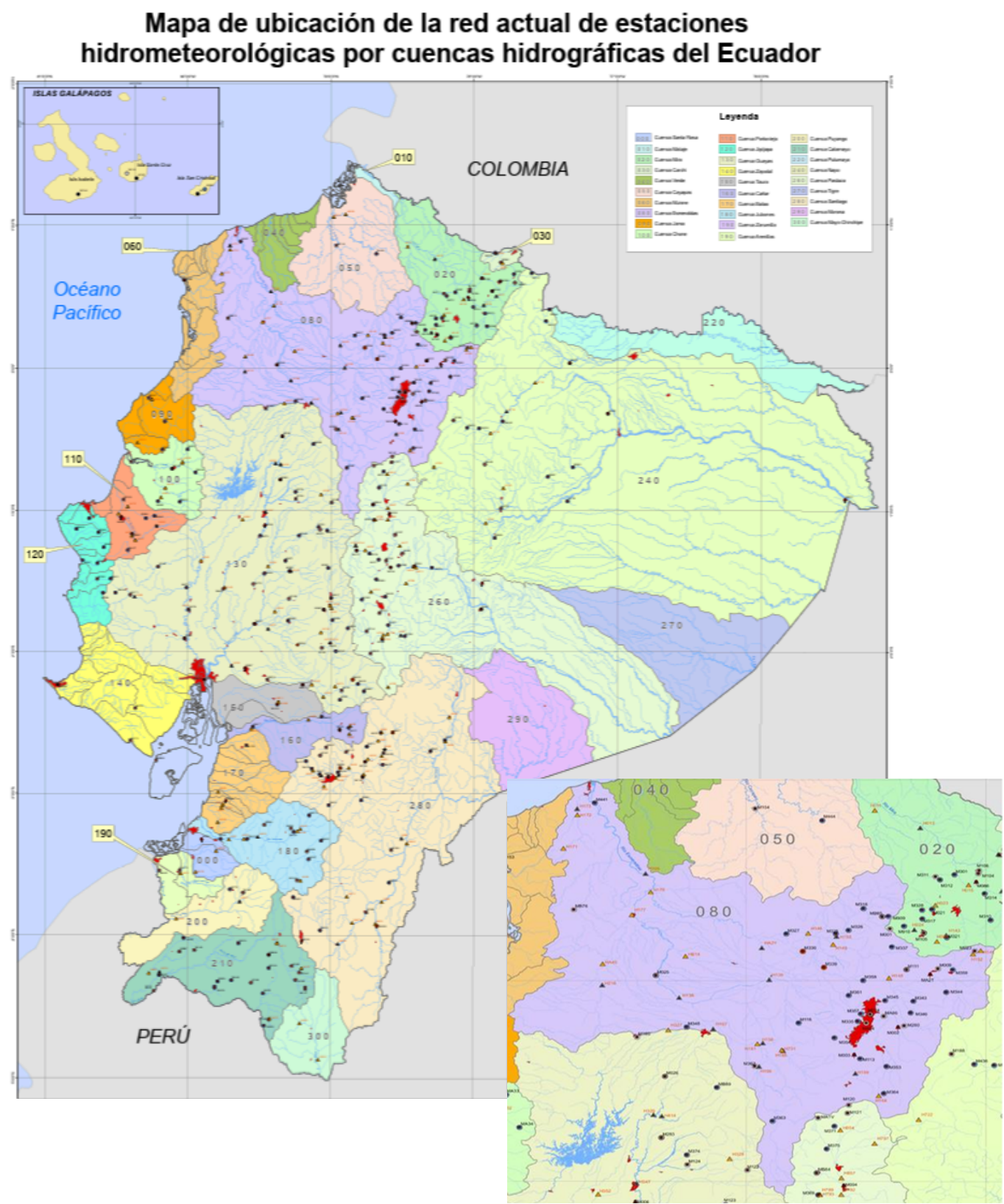


Curva A: refleja una cuenca con gran potencial erosivo (fase de juventud).

Curva B: es una cuenca en equilibrio (fase de madurez).

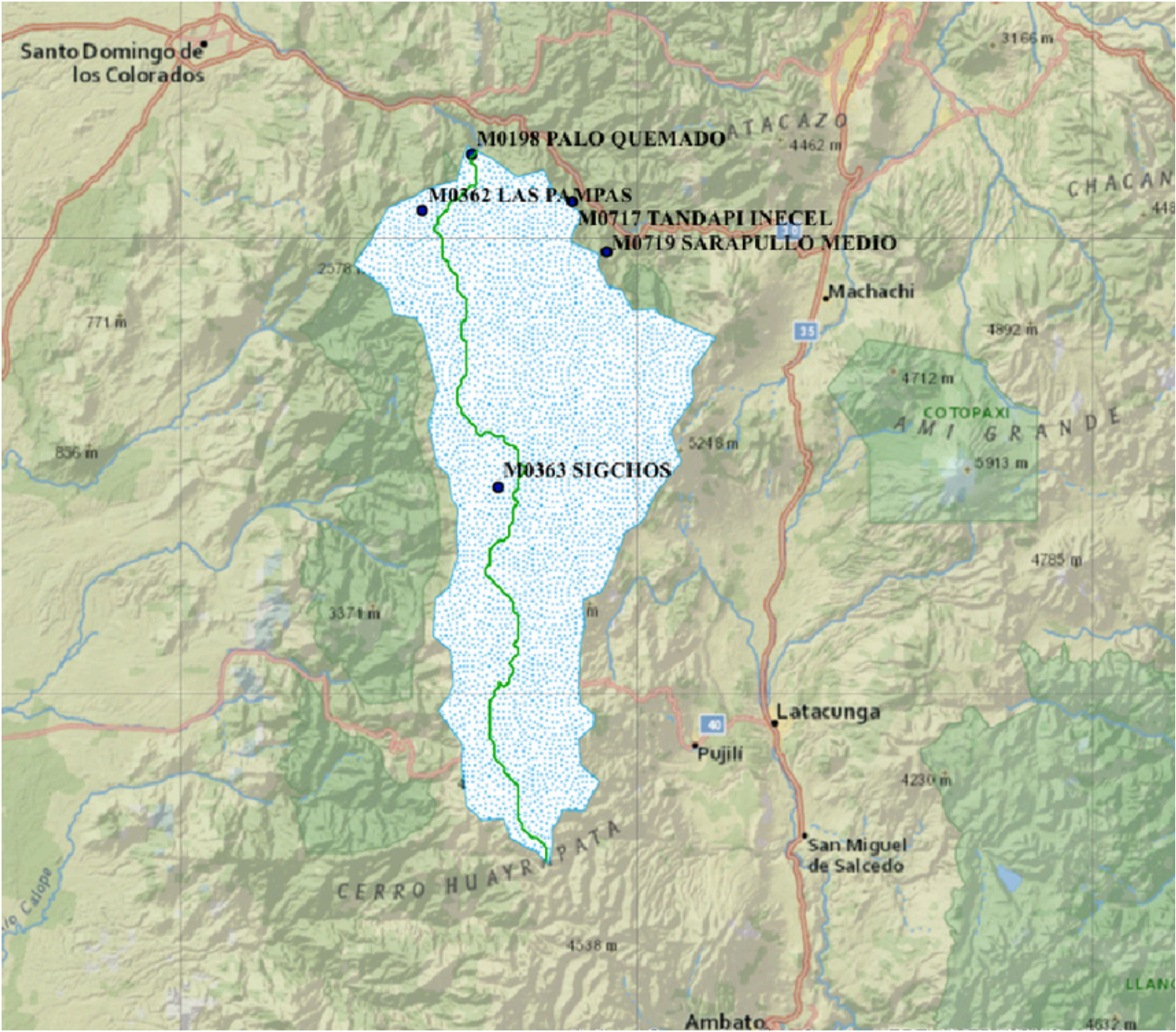
Curva C: es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).





| No. | Estación        | Código | Altitud (msnm) |
|-----|-----------------|--------|----------------|
| 1   | Santo Domingo   | M027   | 3400           |
| 2   | Chiriboga       | M116   | 1750           |
| 3   | Palo Quemado    | M198   | 1160           |
| 4   | La Perla        | M213   | 1410           |
| 5   | Pacto           | M336   | 1280           |
| 6   | Nanegalito      | M339   | 1633           |
| 7   | Las Pampas      | M362   | 1600           |
| 8   | Sigchos         | M363   | 2800           |
| 9   | Tandapi Inecel  | M717   | 1490           |
| 10  | Sarapullo Medio | M719   | 1400           |



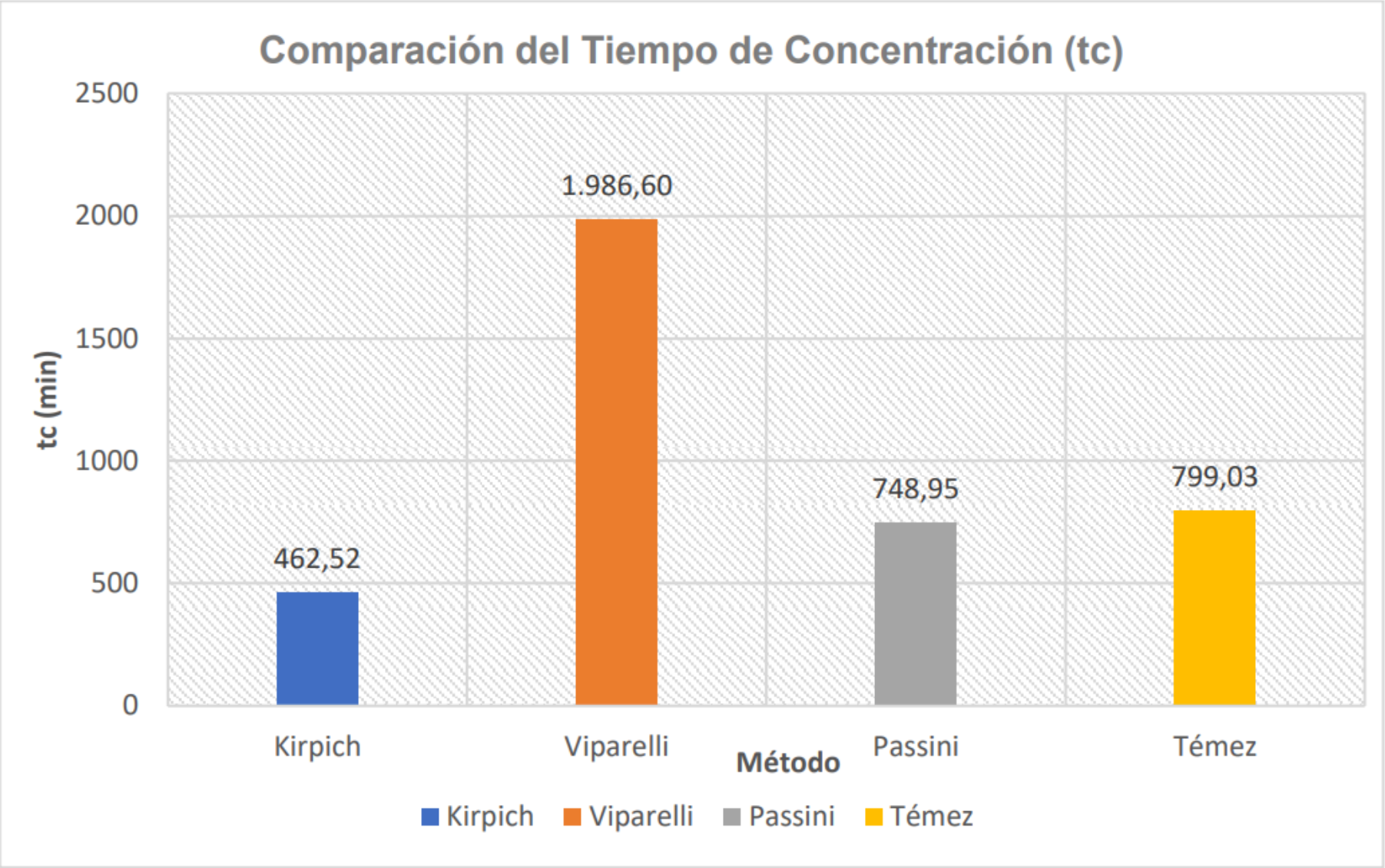


| N°                                       | ESTACIÓN        | PP_MEDIA_ANUAL (mm) | ÁREA_KM2 | ÁREA*PP      |
|------------------------------------------|-----------------|---------------------|----------|--------------|
| 1                                        | PALO QUEMADO    | 3.240               | 37       | 120.984,48   |
| 2                                        | LAS PAMPAS      | 3.764               | 201      | 756.075,27   |
| 3                                        | SIGCHOS         | 3.757               | 918      | 3.450.249,27 |
| 4                                        | TANDAPI INECEL  | 2.712               | 65       | 176.256,72   |
| 5                                        | SARAPULLO MEDIO | 3.261               | 255      | 830.365,10   |
| TOTAL:                                   |                 |                     | 1,476.11 | 5.333.930,85 |
| PRECIPITACIÓN PROMEDIO DE LA CUENCA (mm) |                 |                     | 3.613,50 |              |



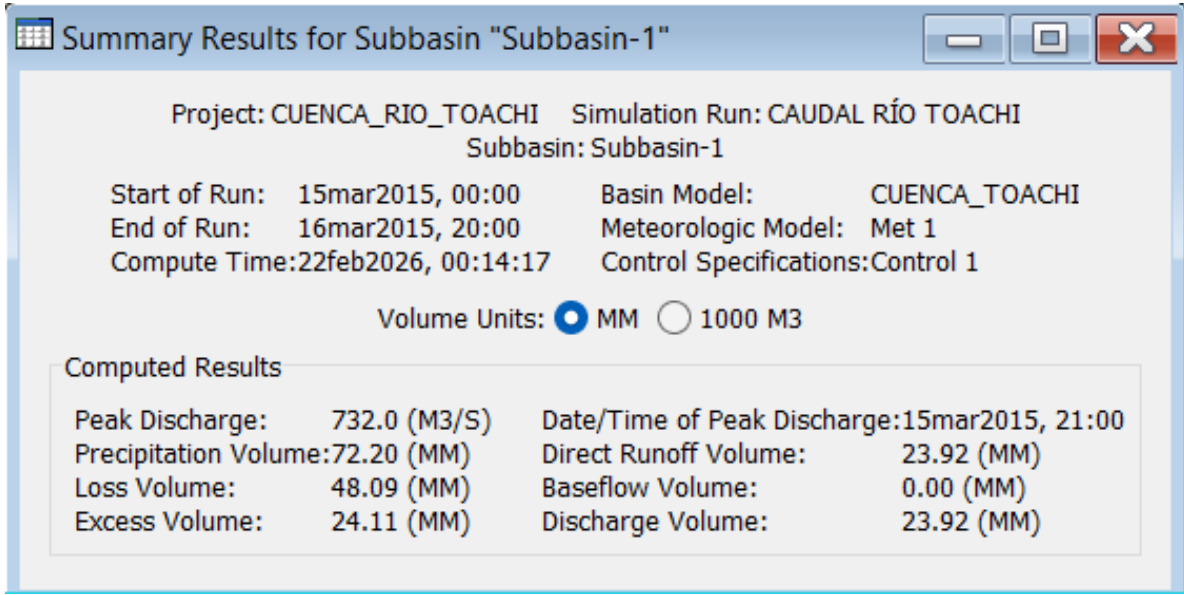
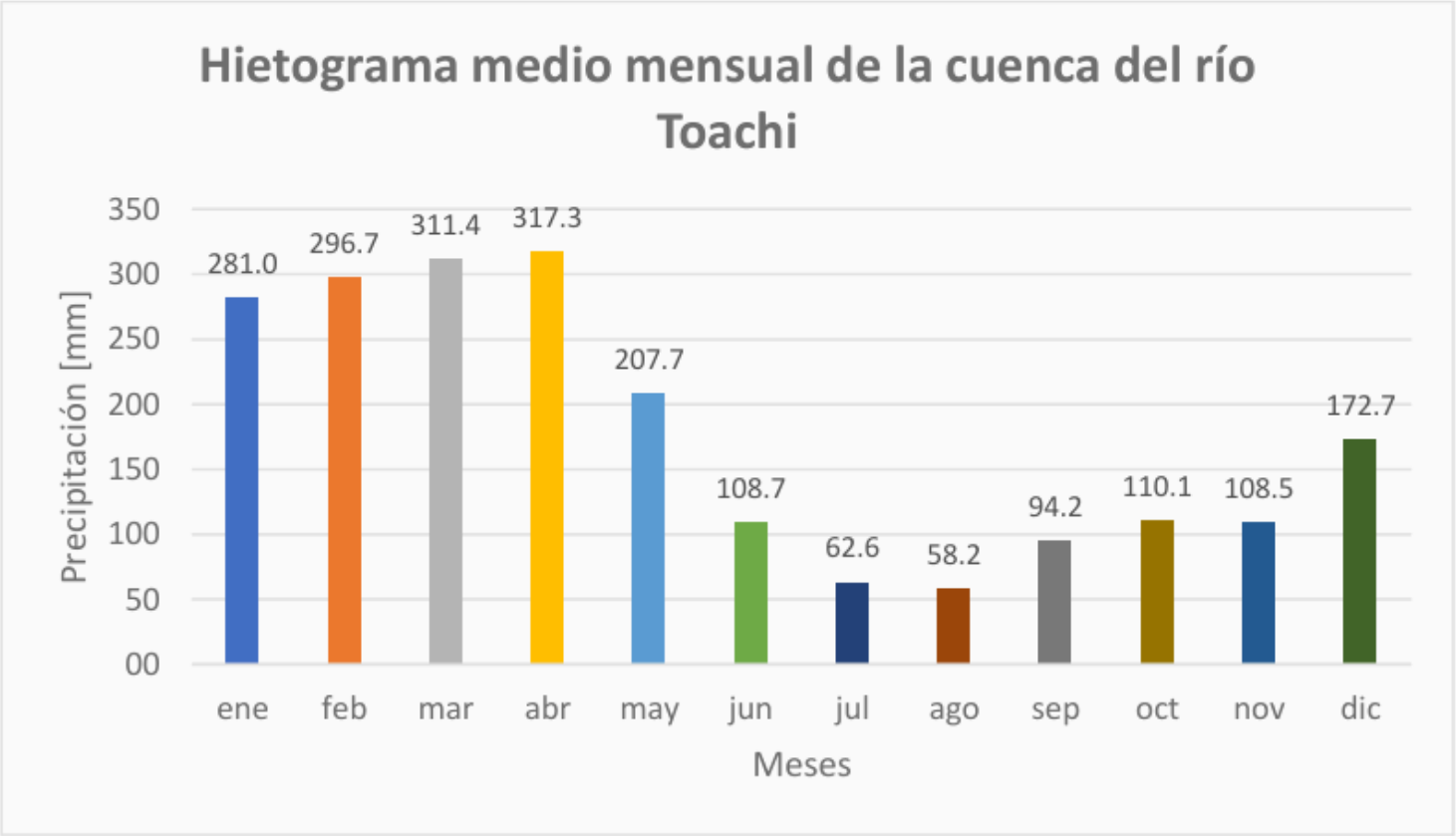
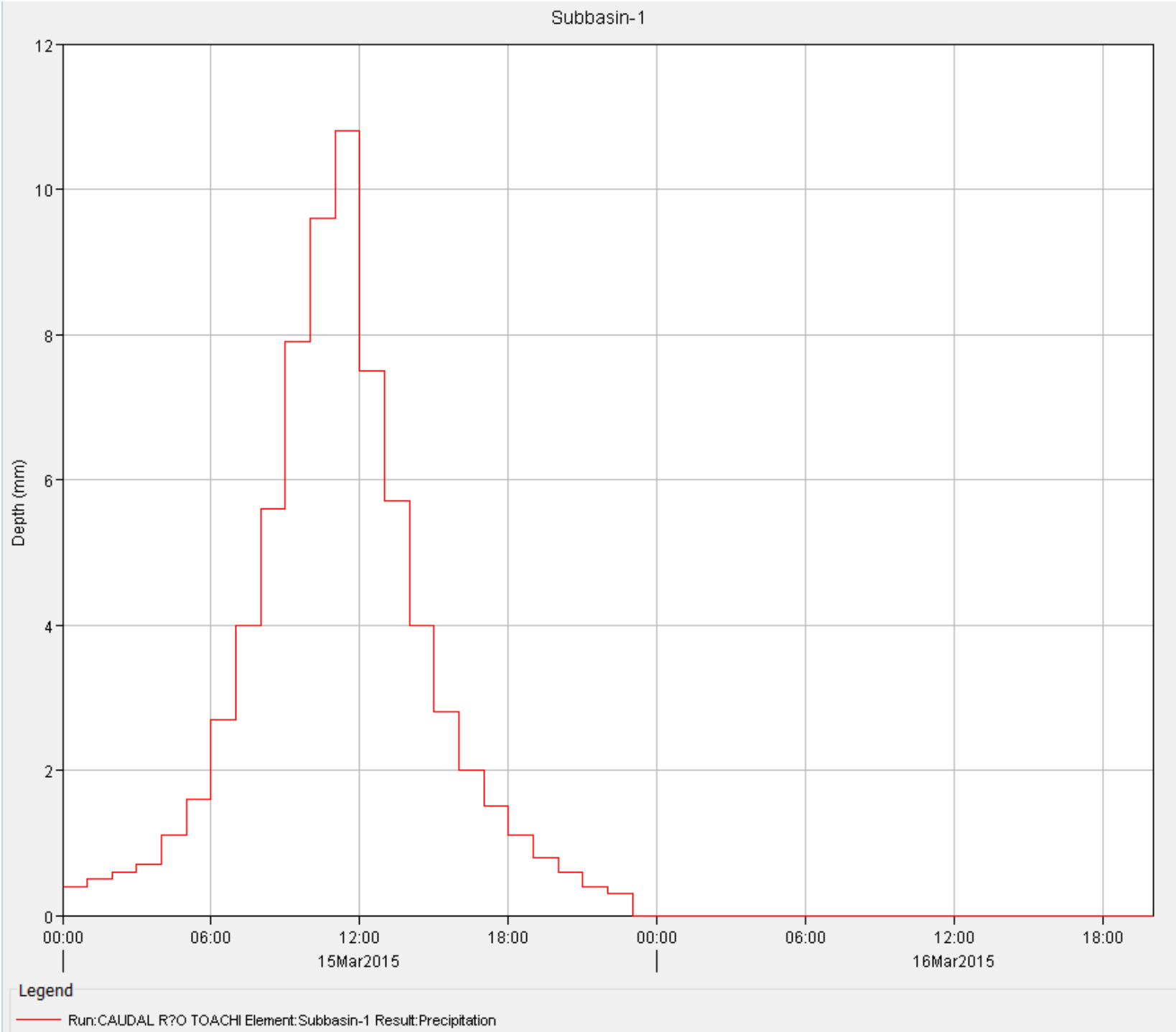
| Autor     | Ecuación                                                  |
|-----------|-----------------------------------------------------------|
| Kirpich   | $T_c = 0,0195 * (L * 1000)^{0,77} * S_c^{-0,385}$         |
| Viparelli | $T_c = 60 \frac{L}{v}$                                    |
| Témez     | $T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{S^{0,25}}\right)^{0,76} * 60$ |
| Passini   | $T_c = \frac{[0,108 * (A * L)^{1/3}]}{S^{0,5}} * 60$      |

|                       | Kirpich  | Viparelli | Passini  | Témez    |
|-----------------------|----------|-----------|----------|----------|
| Cuenca del Río Toachi | TC (min) | TC (min)  | TC (min) | TC (min) |
|                       | 462,51   | 1.986,6   | 748,95   | 799,03   |

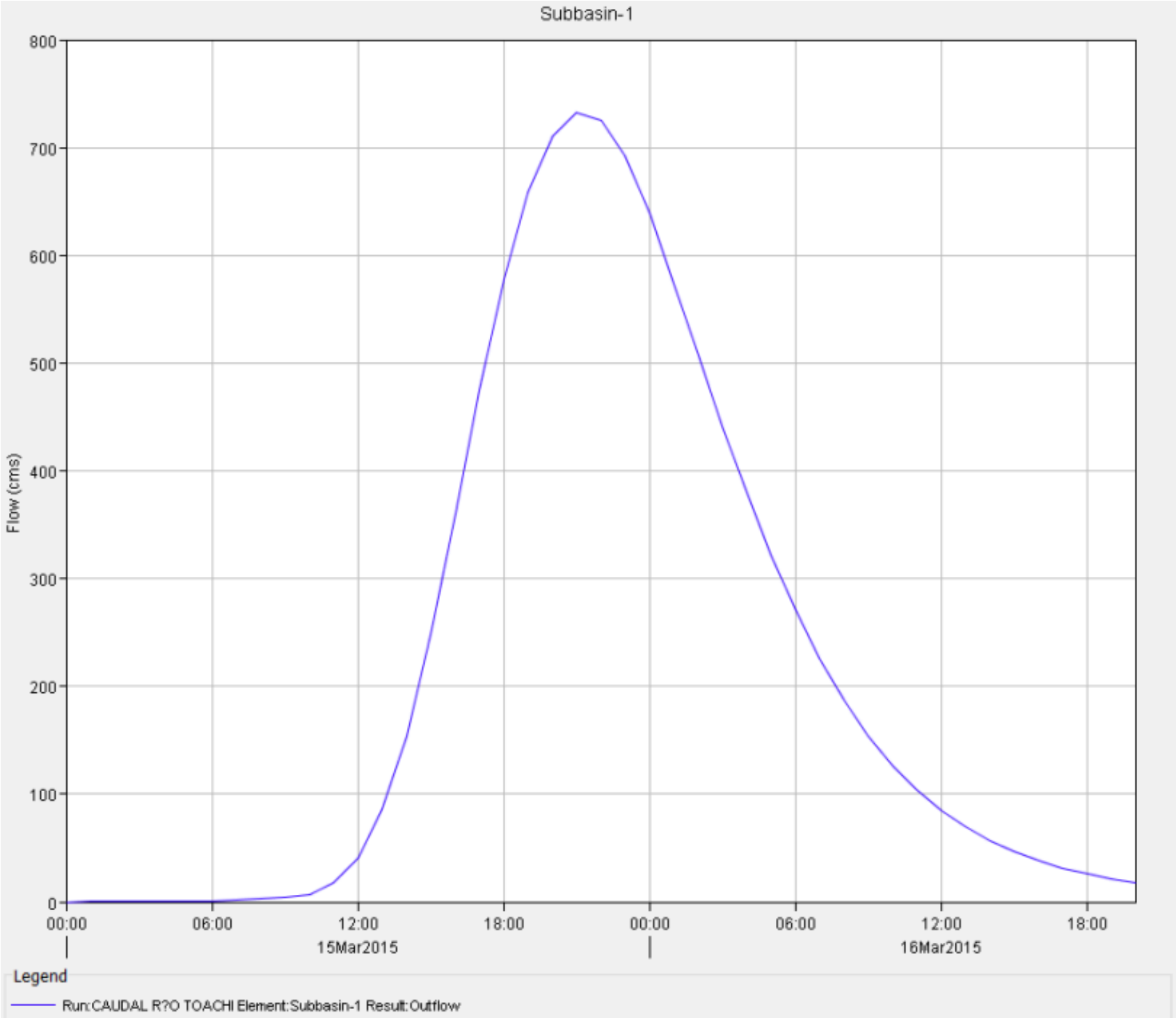


Se adoptó un Tc: 773,99 minutos









Caudales máximos

| Periodo de Retorno (años) | HEC-HMS (m3/s) | Sandoval (m3/s) | Diferencia % |
|---------------------------|----------------|-----------------|--------------|
| 5                         | 468,6          | 207,3           | 126,0        |
| 10                        | 532,5          | 266,8           | 99,6         |
| 25                        | 614,7          | 445,2           | 38,1         |
| 50                        | 675,4          | 742,6           | 9,0          |
| 100                       | 742,4          | 947,5           | 21,6         |
| 500                       | 899,2          | 1423,3          | 36,8         |
| 1000                      | 975,2          | 1628,2          | 40,1         |



| Parámetros Mormofemetricos          |                   |        |
|-------------------------------------|-------------------|--------|
| Parámetro                           | Valor             | Unidad |
| Área de la cuenca                   | 1476.11           | km²    |
| Perímetro                           | 209.81            | km     |
| Longitud cauce principal            | 99.33             | km     |
| Pendiente media de la cuenca        | 20.81             | %      |
| Pendiente media del cauce principal | 4.5               | %      |
| Coeficiente de compacidad (Kc)      | 1.53              | -      |
| Forma de la Cuenca                  | Elíptica alargada |        |
| Parámetros Hidrológicos             |                   |        |
| Precipitación Media (mm)            | 3613.5            | mm     |
| Número de curva (CN – SCS)          | 76                | -      |
| Tiempo de concentración (Tc)        | 773.99            | min    |
| Caudal Máximo TR = 100 años         | 742.4             | m³/s   |
| Caudal Diseño                       | 742.4             | m³/s   |
| Velocidad media del viento          | 6.2               | km/h   |



Subbasin
Loss
Transform
Options

**Basin Name:** CUENCA\_TOACHI

**Element Name:** Subbasin-1

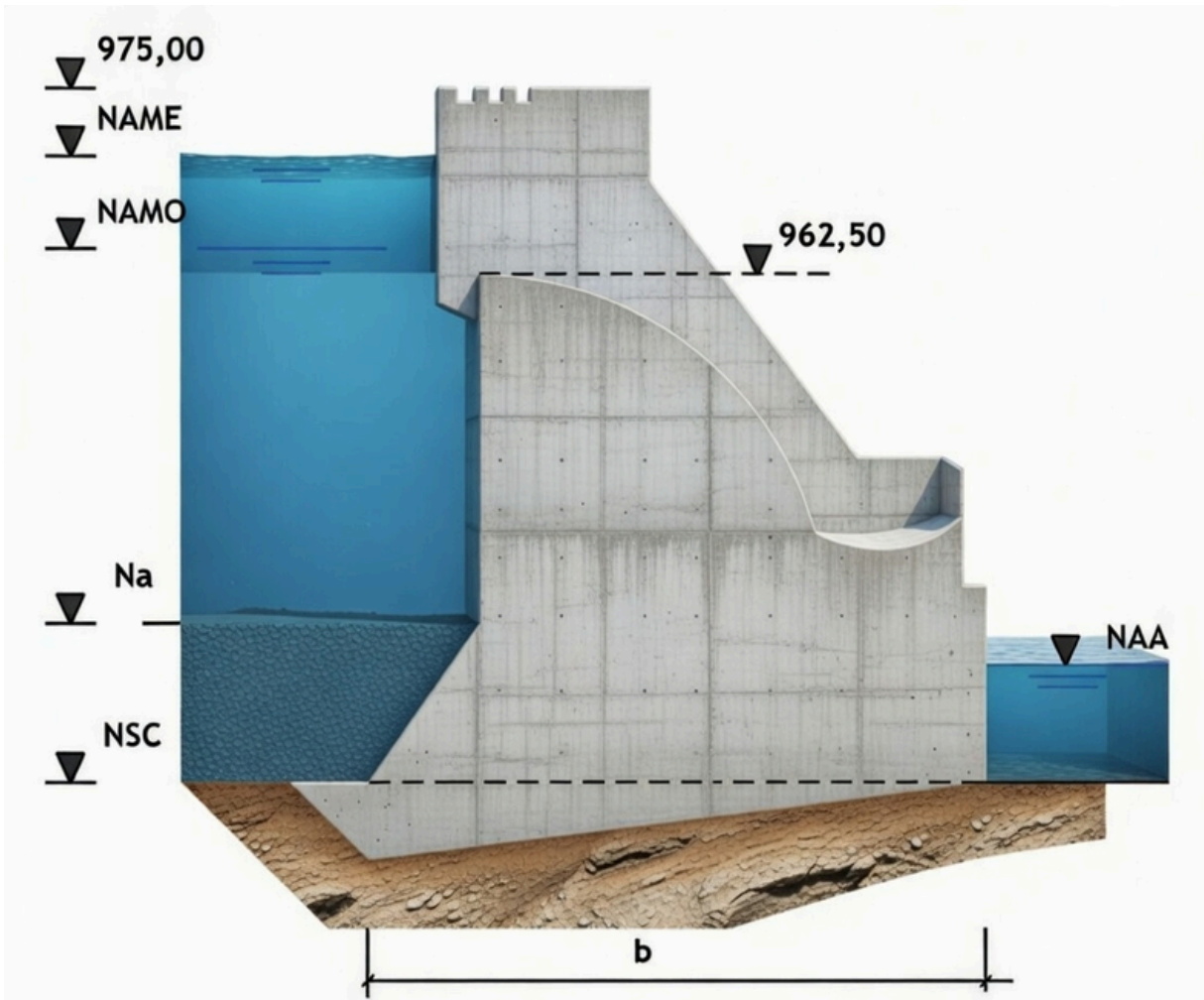
Initial Abstraction (MM)

\*Curve Number:

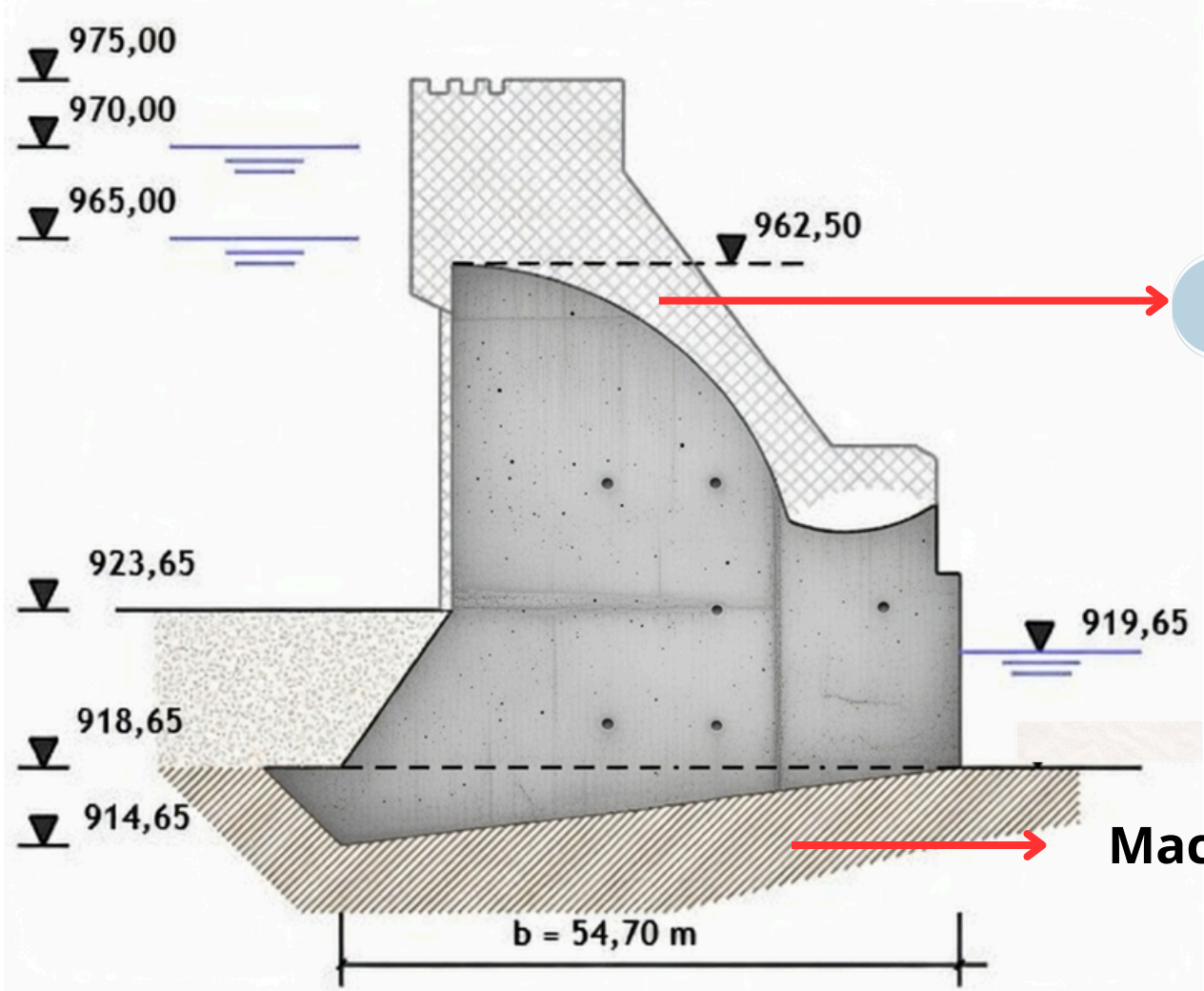
\*Impervious (%)



Presa

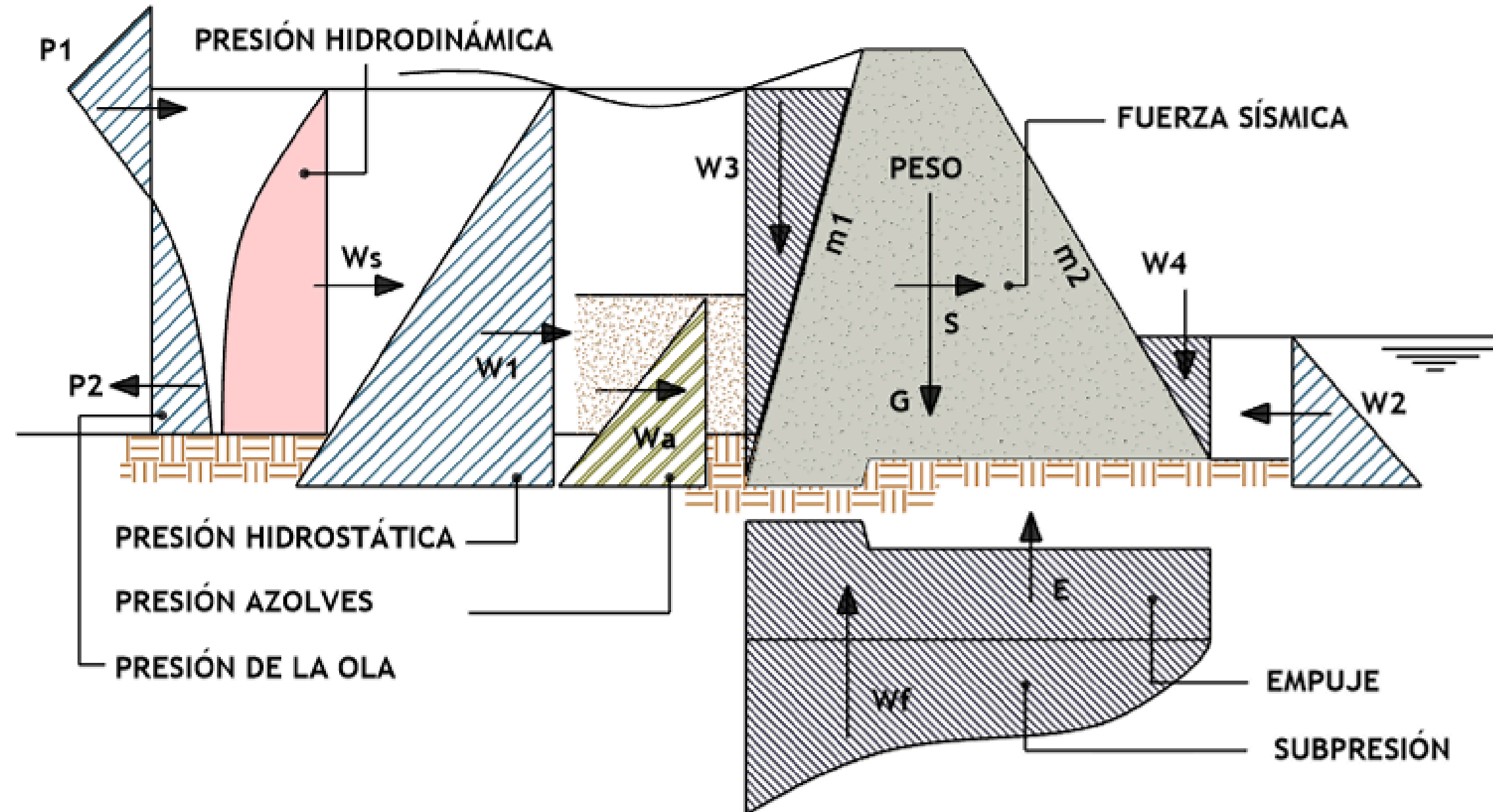


**NAME:** Nivel de aguas Máximas extraordinarias  
**NAMO:** Nivel de aguas máximas ordinarias.  
**Na:** Nivel de azolves (Sedimentación)  
**NC:** Nivel Solera del Cauce  
**NAA:** Nivel aguas abajo



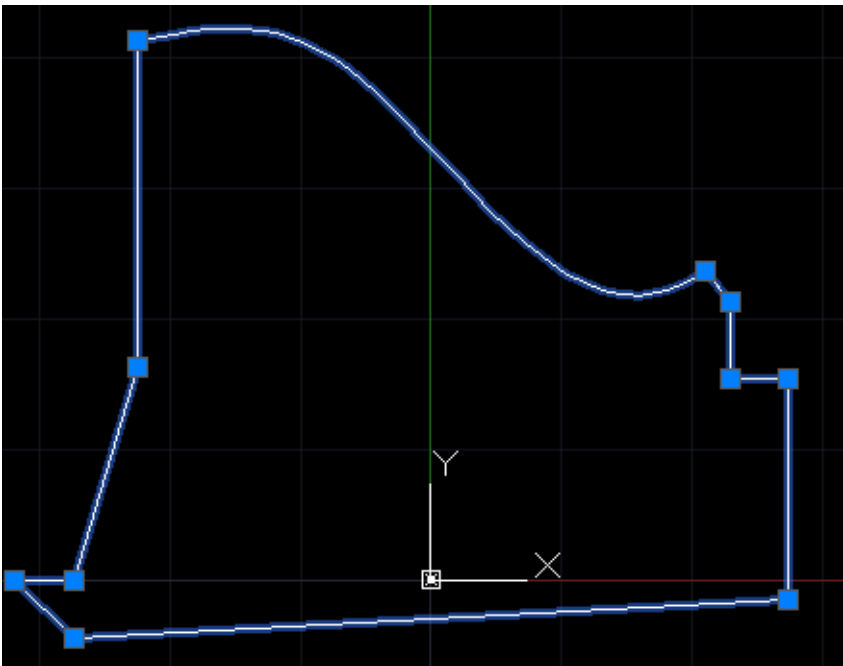
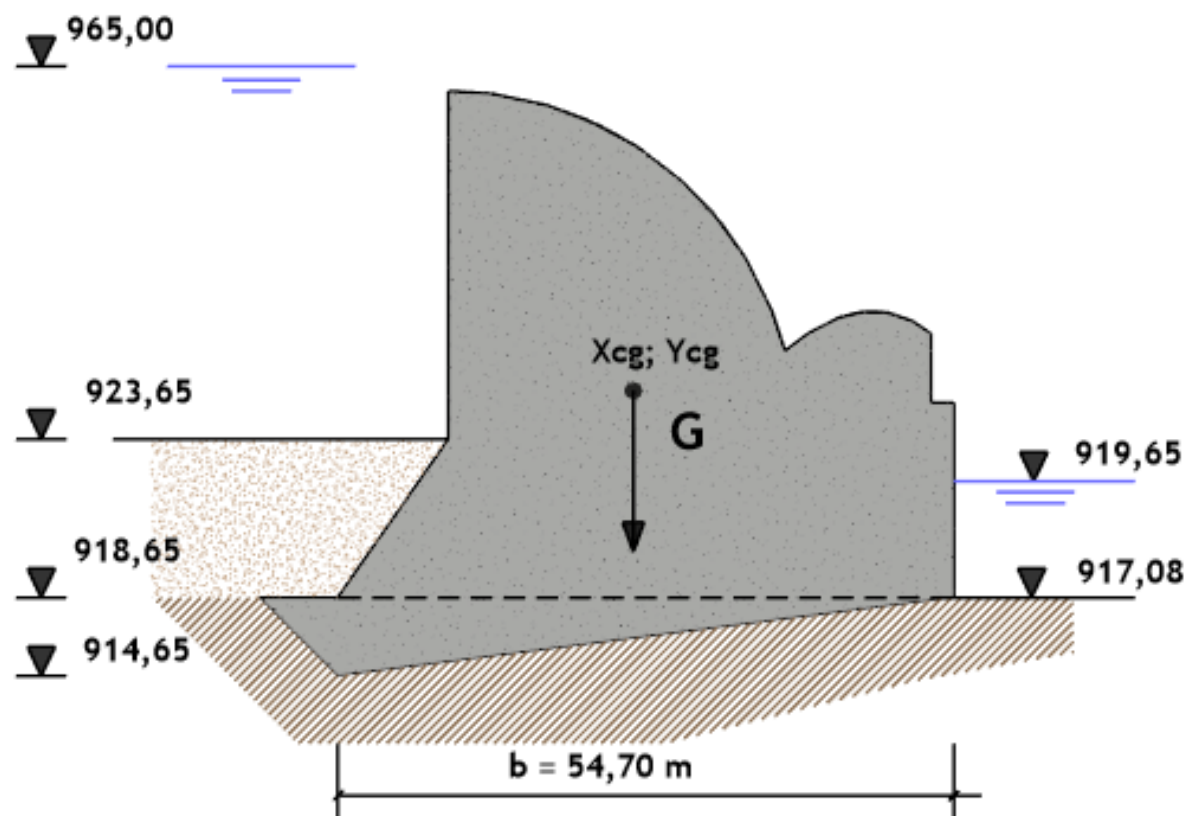
| Sección       | Altura   | Unidad |
|---------------|----------|--------|
| Tipo de presa | GRAVEDAD |        |
| Presa         | 60,00    | m      |
| Vertedero     | 44,00    | m      |
| Ancho         | 54,70    | m      |





- Presión hidrodinámica
- Presión hidrostática
- Presión azolves
- Empuje por flotación
- Subpresión
- Presión por oleaje
- Fuerza por sismo





Esquema y centro de gravedad realizados en AutoCAD

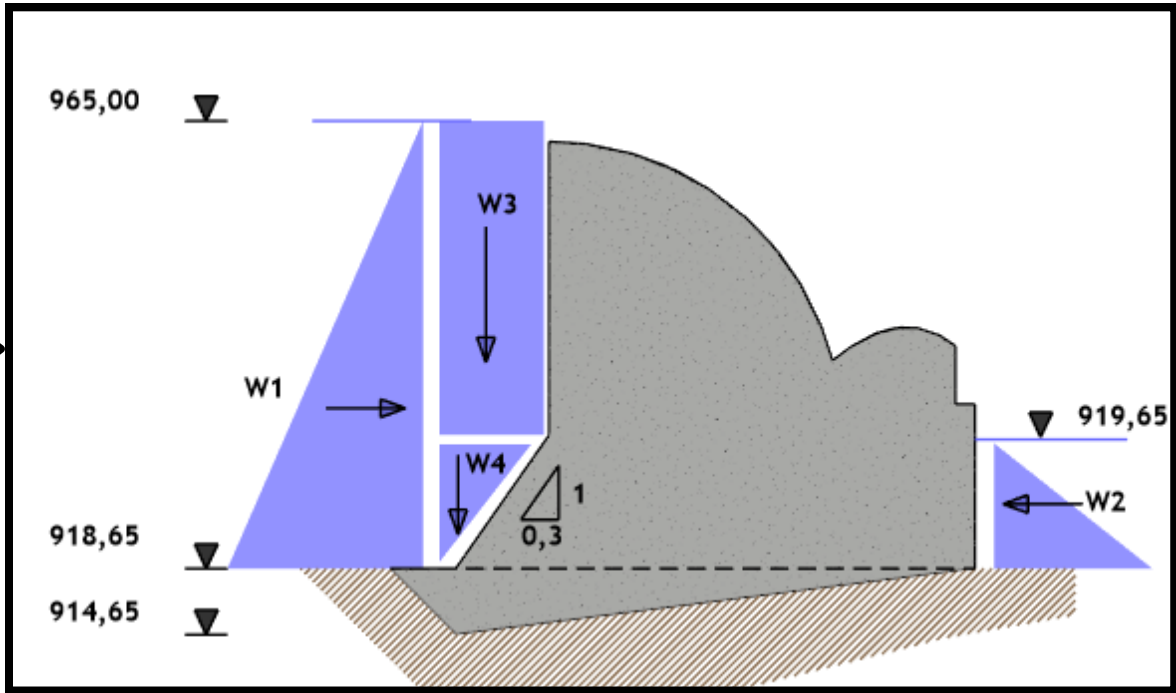
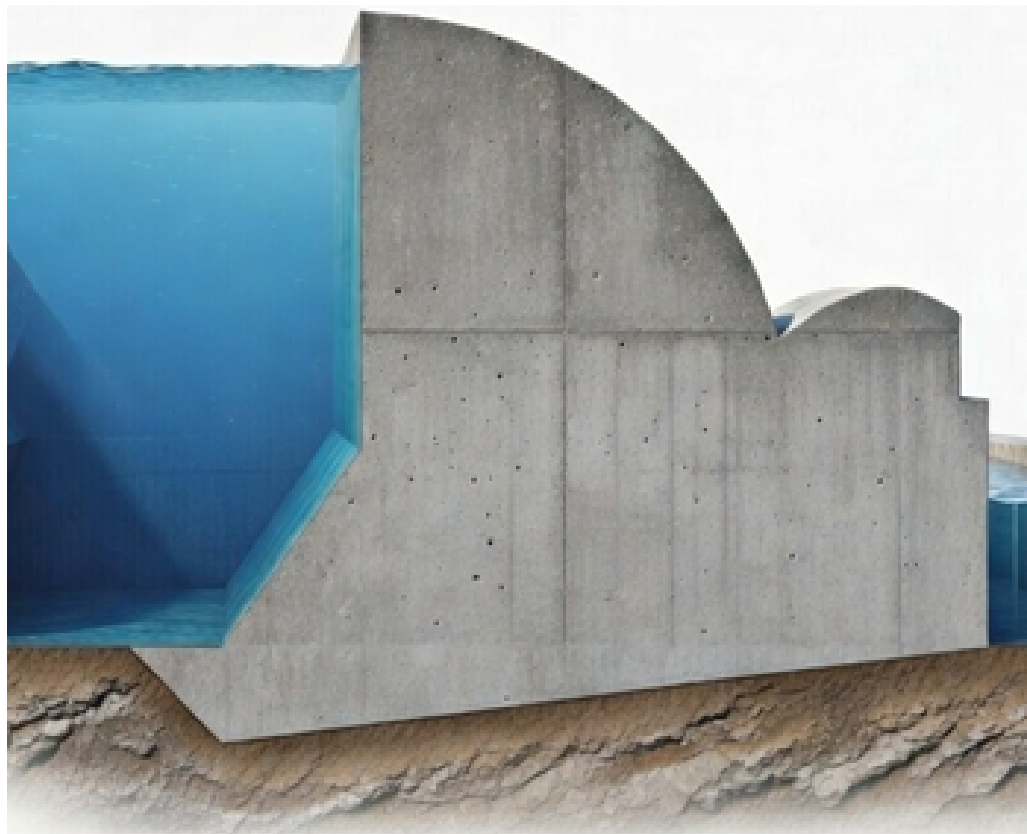
| REGIONS             |                    |
|---------------------|--------------------|
| Area:               | 1753.94            |
| Perimeter:          | 189.21             |
| Bounding box:       | X: -31.85 -- 27.35 |
|                     | Y: -4.50 -- 42.27  |
| Centroid:           | X: -2.63           |
|                     | Y: 14.70           |
| Moments of inertia: | X: 619884.81       |
|                     | Y: 364556.86       |

| Cuerpo a gravedad  |         |      |
|--------------------|---------|------|
| Centro de gravedad |         |      |
| Xcg                | -2,63   | m    |
| Ycg                | 14,7    | m    |
| Propiedades        |         |      |
| Peso específico    | 2,4     | t/m3 |
| Área del cuerpo    | 1753,94 | m2   |

$G = 4209,45 \text{ t}$



Cuerpo de presiones hidrostáticas ejercidas sobre el vertedero de acuerdo con la inclinación del talud, W1, W2; W3 y W4, cuerpos de presión hidrostática.



$$W_i = \gamma_{H2O} \frac{H^2}{2} b ; W_i = \gamma_{H2O} * V_{cp}$$

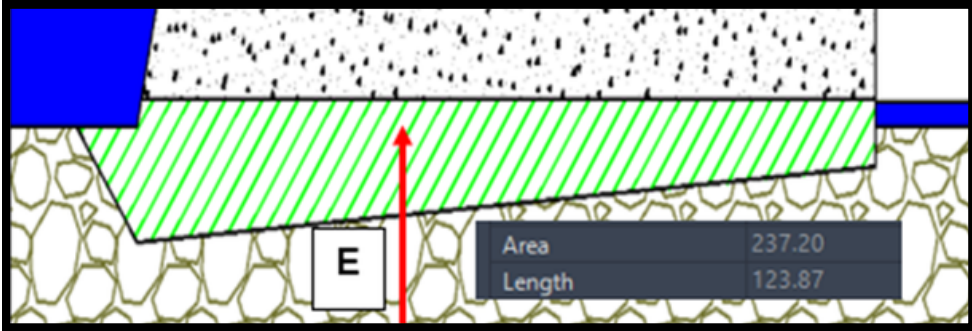
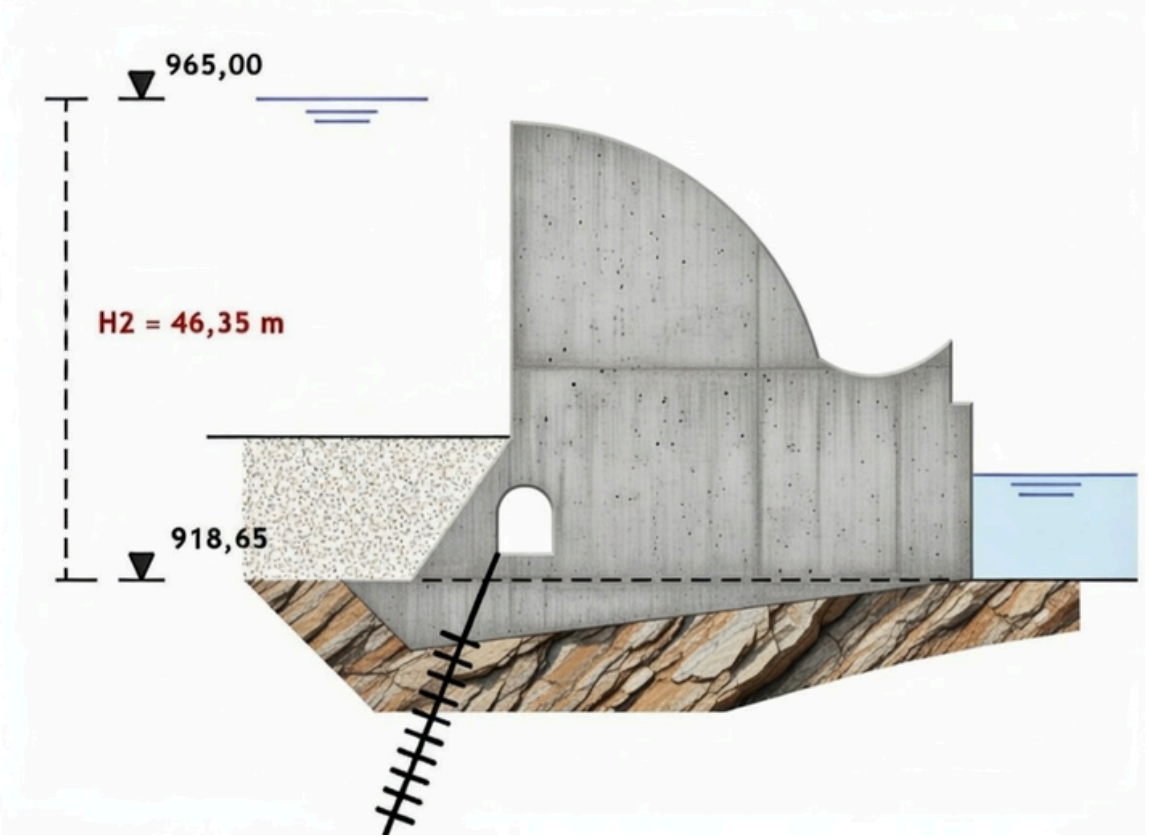
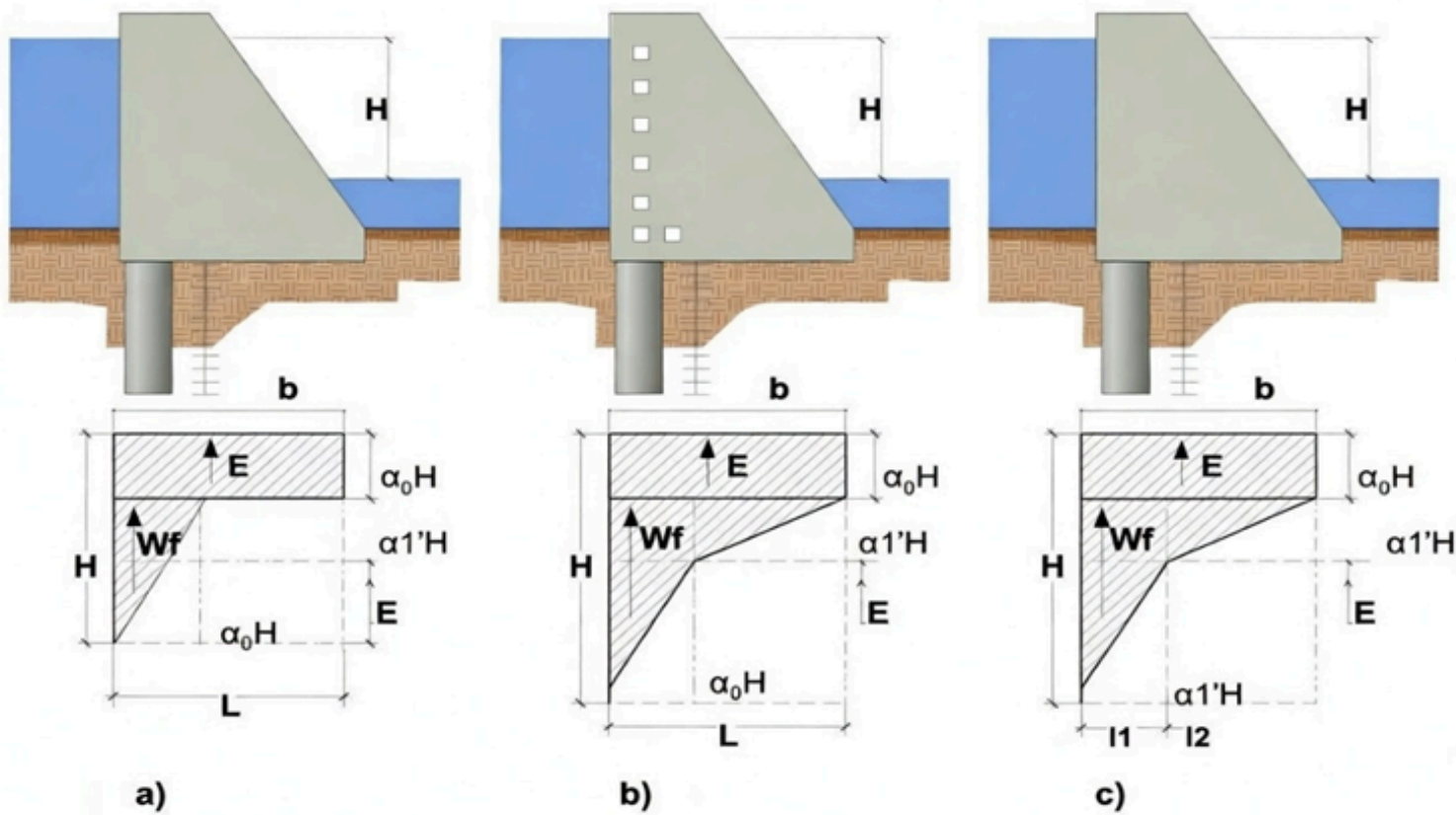
*b*: Ancho de dovela,

*H*: Profundidad hasta la cimentación.

$\gamma$ : Peso volumétrico del agua

| Cuerpos de presión | Altura [m] | Presión hidrostática [t] |
|--------------------|------------|--------------------------|
| W1                 | 50,35      | 1267,56                  |
| W2                 | 2,57       | 3,30                     |
| W3                 | 123,75     | 123,75                   |
| W4                 | 16,35      | 133,66                   |





| Tipo de presa                                        | $\alpha 1'$ | $\alpha 1''$ |
|------------------------------------------------------|-------------|--------------|
| Gravedad $H < 25$                                    | 0,3         | 0            |
| Gravedad $25 < H < 75$                               | 0,4         | 0,15         |
| Gravedad $H > 75$                                    | 0,5         | 0,25         |
| Contrafuertes                                        | 0,4         | 0            |
| Arco                                                 | 0,5         | 0,25         |
| $\alpha 0$ . Coeficiente de pérdida de carga inicial | 0,05 - 0,08 |              |
| $\alpha 2$ . Coeficiente de porosidad de la zona.    | 0,70 - 0,95 |              |

$\alpha 1'$  coeficiente de cortina y  $\alpha 1''$  coeficiente de drenaje.

Grishin, 1979

$$W_f = 0.5 \gamma H [L(1 - \alpha_0) + b \alpha_1''] \alpha_2$$

$$W_f = 232,56 \text{ t}$$

$$E = \gamma_{H20} \times V_{cp}$$

|          |       |                |
|----------|-------|----------------|
| Área     | 237,2 | m <sup>2</sup> |
| Ancho    | 1     | m              |
| Empuje E | 237,2 | t              |



Ecuaciones propuestas por Nedriga (1979)

$$P_{max} = k_p \gamma_{H_2O} \times h_o \times \left( H + \frac{h_o}{2} \right)$$

$$M_{max} = k_M \times \gamma_{H_2O} \times \left( \frac{h^2}{6} + \frac{hH}{2} + \frac{H^2}{2} \right)$$

$$h_o = 0,073 \times k \times W \times \sqrt{D \times \beta}$$

$$\lambda = 0,073 \times W \times \sqrt{D/\beta}$$

$$\beta = \frac{1}{9 + 19e^{-\frac{14}{W}}}$$

$$k = 1 + e^{-\frac{0,4D}{W}}$$

$h_o$ : Altura de la ola

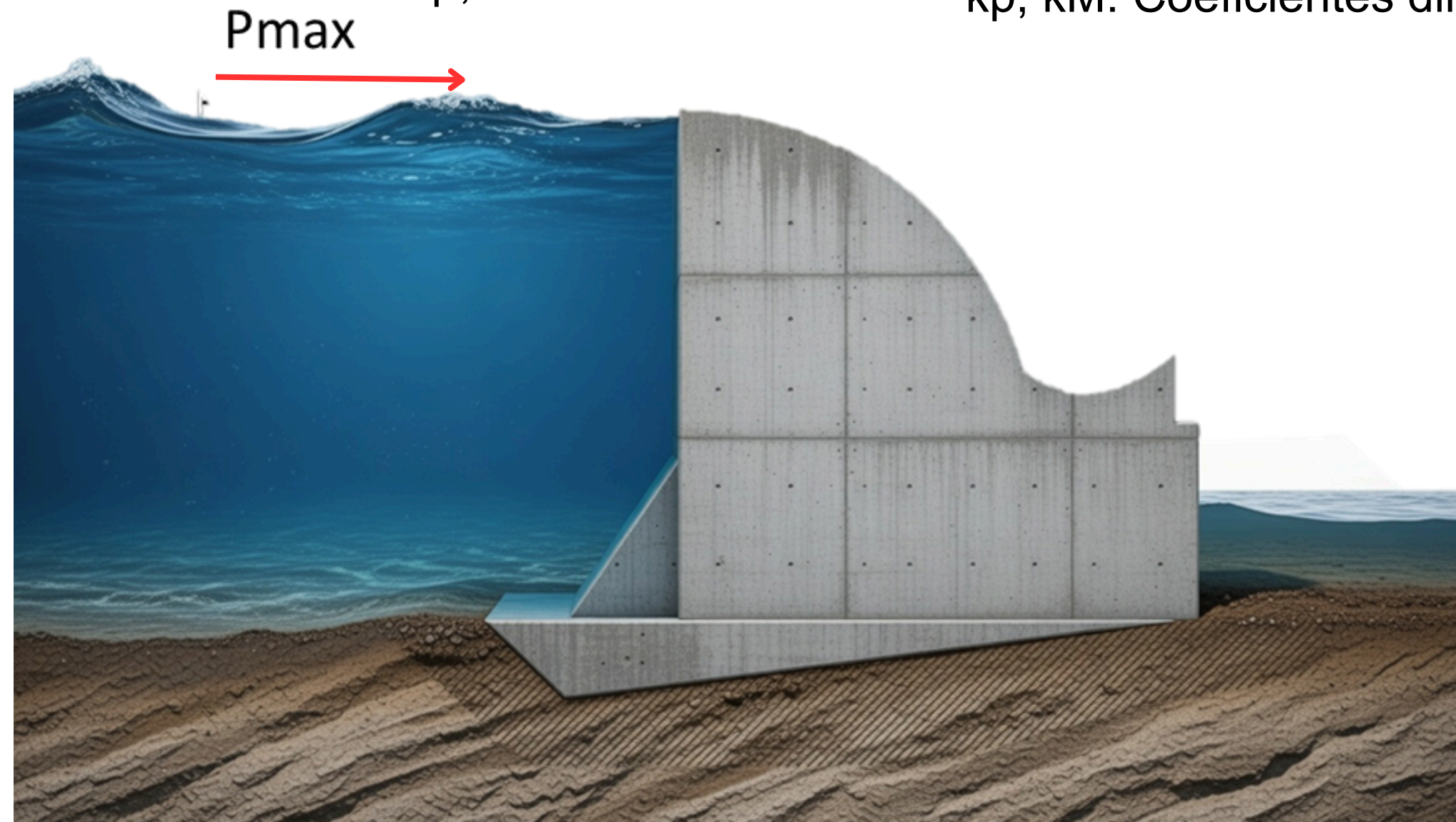
$\lambda$  : Longitud de la ola

$\beta$ ,  $k$ : Coeficientes

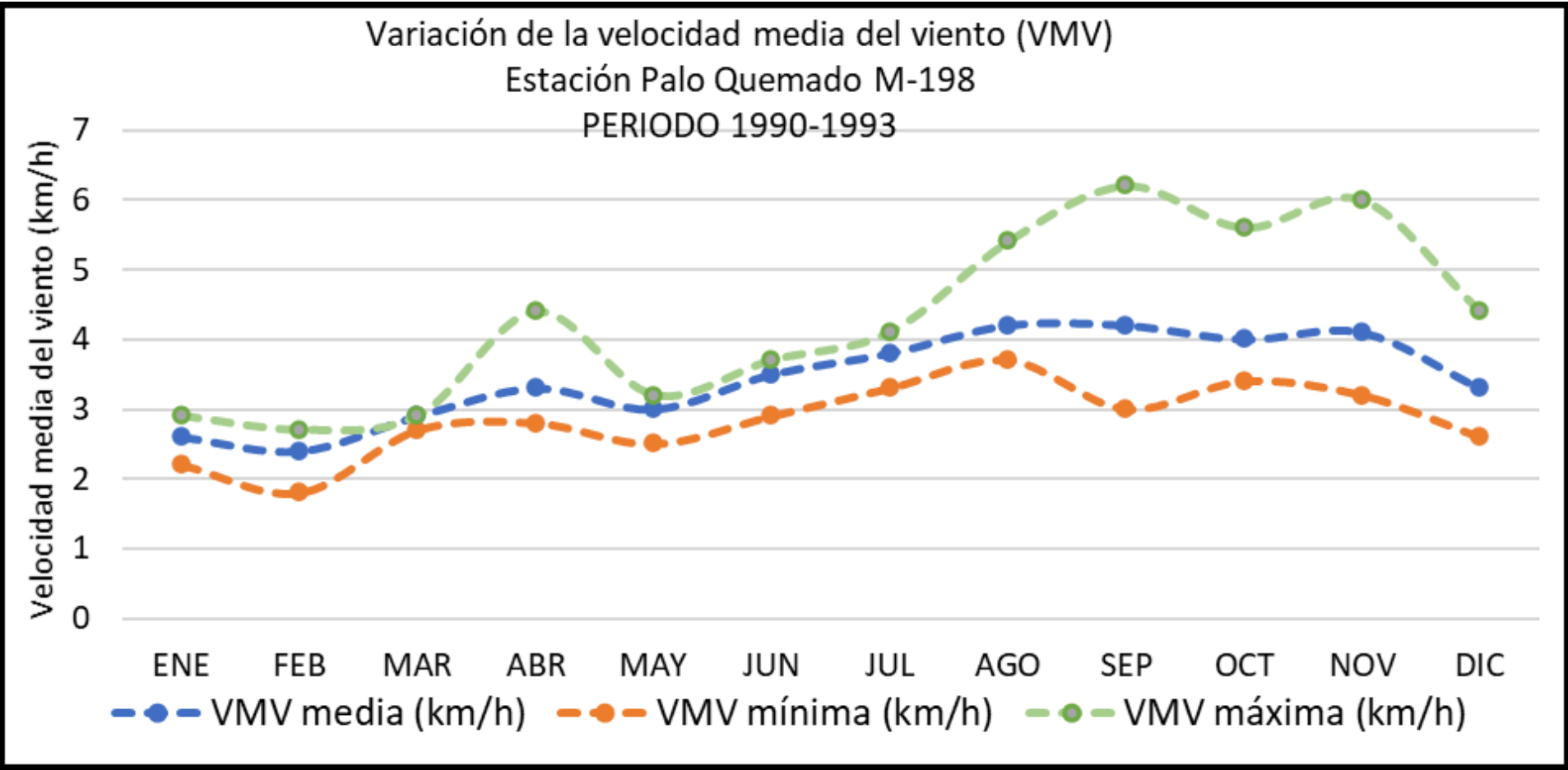
$D$ : recorrido de la ola (km)

$W$ : Velocidad del viento (m/s)

$k_p$ ;  $k_M$ : Coeficientes dinámicos







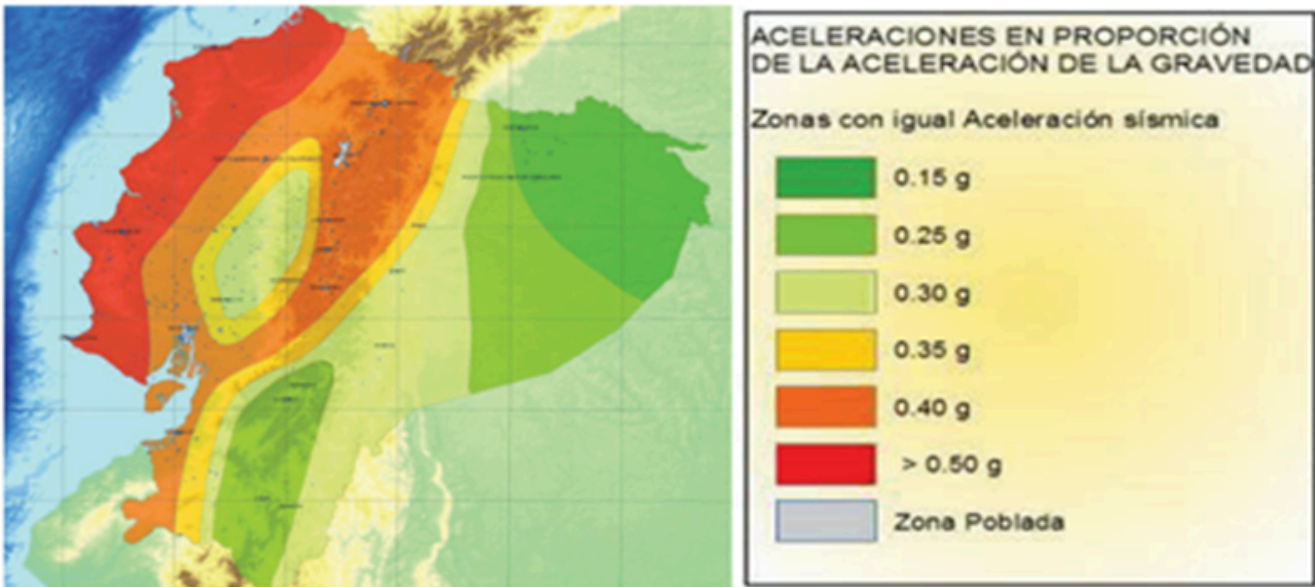
- Velocidad del viento = 6,20 km/h
- $W = 1,72 \text{ m/s}$
- Distancia de recorrido
- $D = 1,57 \text{ km}$

$$ho = 0,073 \times k \times W \times \sqrt{D \times \beta}$$

$$ho = 0,10 \text{ m}$$

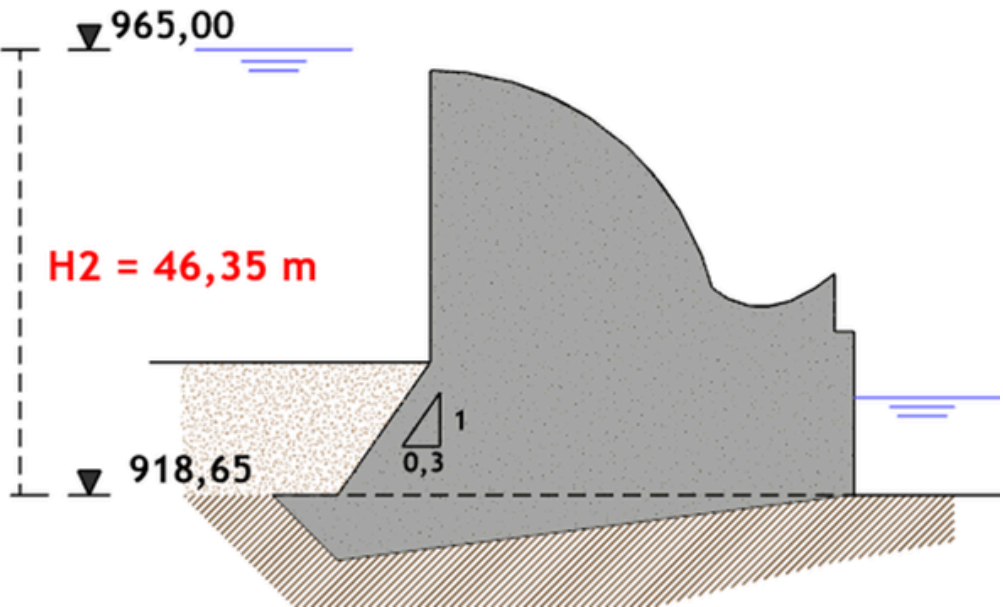


Altura de la ola con sismo (hs1)



| Zona sísmica                        | I          | II   | III  | IV   | V    | VI       |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|------|----------|
| Valor factor Z                      | 0,15       | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | ≥ 0,50   |
| Caracterización del peligro sísmico | Intermedia | Alta | Alta | Alta | Alta | Muy alta |

$Z = 0,40g$



| Tipos de suelo (Norma SP 58,13330,2012) | Período natural de vibración $t_e$ (s) |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| A (ROCAS)                               | 0,20 a 0,45                            |
| B (GRANULARES)                          | 0,40 a 0,80                            |
| C (SUELTOS SATURADOS)                   | 0,80 a 1,05                            |

Poliakov, 1983

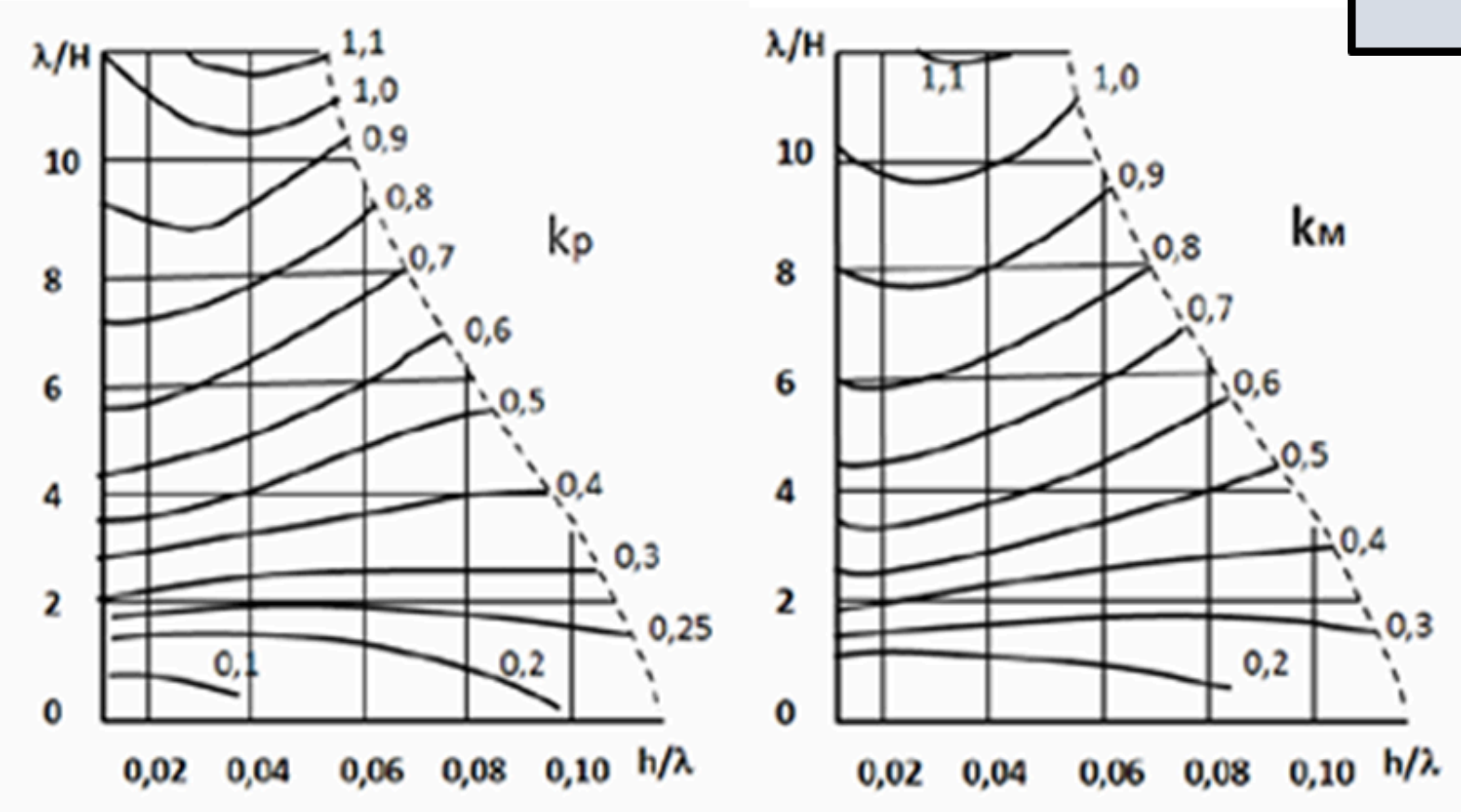
$h_{s1} = 0,5\alpha * t_e * \sqrt{gH_2} \rightarrow (Nedriga)$

$h_{s1} = 1,92\text{ m}$

Comisión Federal de Electricidad, México

$\alpha_h = \frac{Z}{1 + 2Z}$



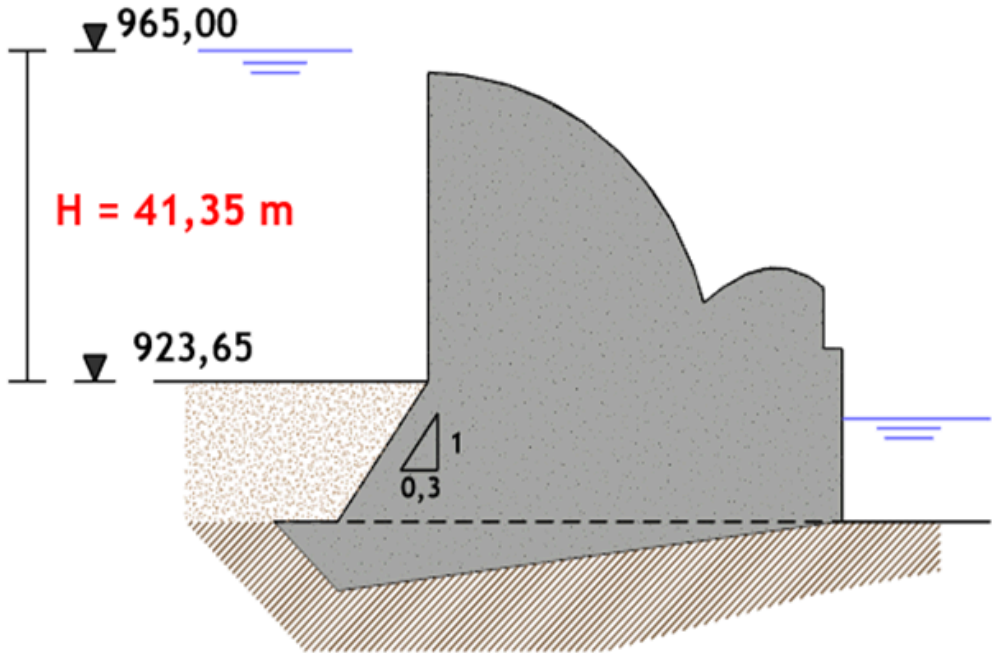


$$P_{max} = k_p \gamma_{H2O} \times h_o \times \left( H + \frac{h_o}{2} \right)$$

$$M_{max} = k_M \times \gamma_{H2O} \times \left( \frac{h^2}{6} + \frac{hH}{2} + \frac{H^2}{2} \right)$$

|                            |           |        |
|----------------------------|-----------|--------|
| Coeficientes de la fórmula | $\beta$   | 0,11   |
|                            | $k$       | 1,69   |
| Longitud de la ola         | $\lambda$ | 0,47 m |

|                                          |               |      |
|------------------------------------------|---------------|------|
| Parámetros adimensionales para nomograma | $\lambda / H$ | 0,01 |
|                                          | $h / \lambda$ | 4,06 |



$$h_o = 0,10 \text{ m}$$

$$h_{s1} = 1,92 \text{ m}$$

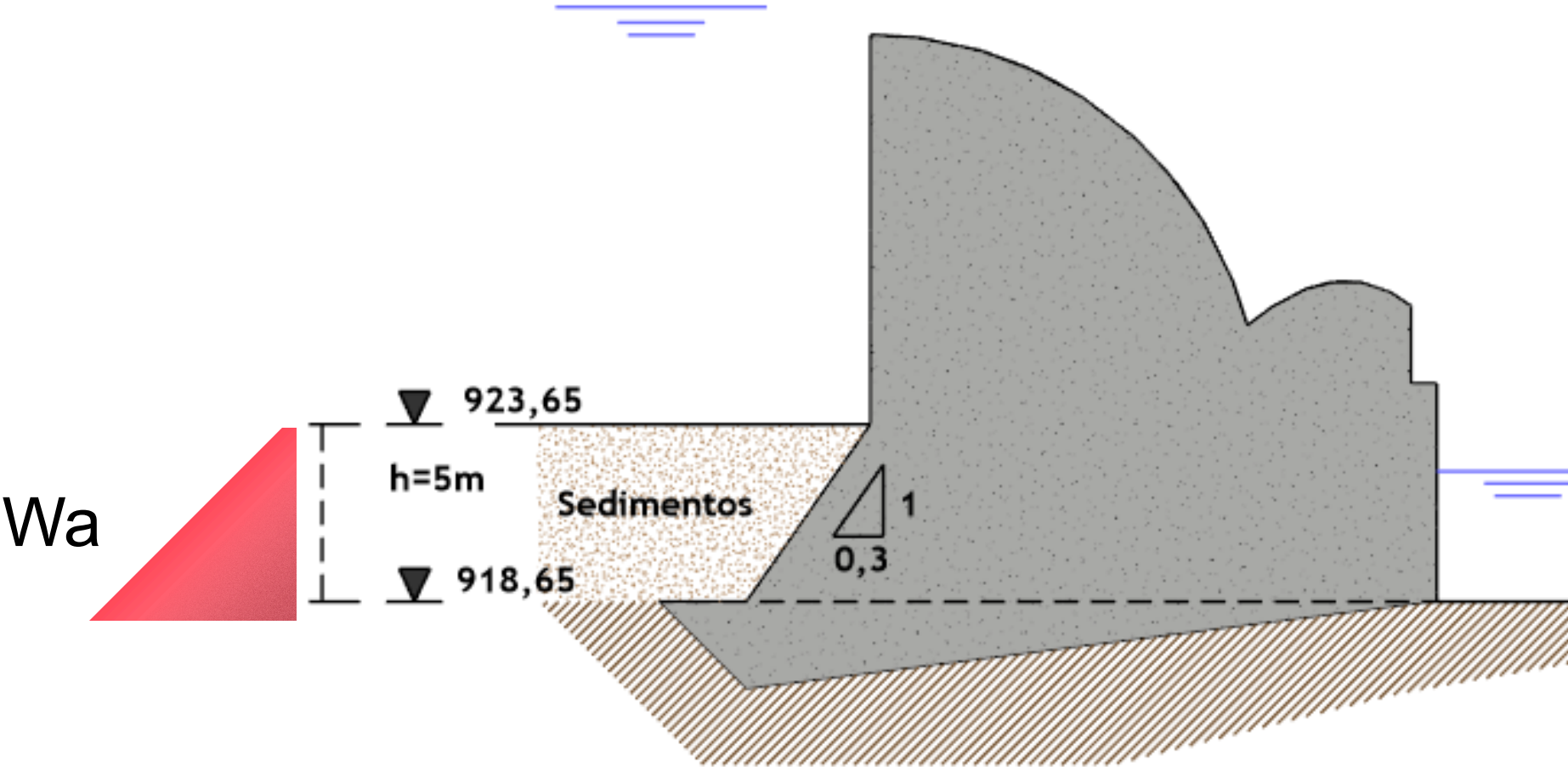
Valores adoptados mínimos debido a que no está dentro del rango

$$k_P = 0,10 ; k_M = 0,20$$

$$P_{max} = 8,12 \text{ t}$$

$$M_{max} = 343,76 \text{ t.m}$$





| Tipo de sedimentos     | kp       | e   |
|------------------------|----------|-----|
| Para arenas sueltas    | 0,64     | 0,9 |
| Arenas medio compacta  | 0,52     | 0,7 |
| Arena bien compactadas | 0,49     |     |
| Para arcillas          | 1 a 0,67 |     |

$Wa = \gamma_a \frac{ha^2}{2} K_p$

$\gamma_{es} = 2,70 \text{ t/m}^3$

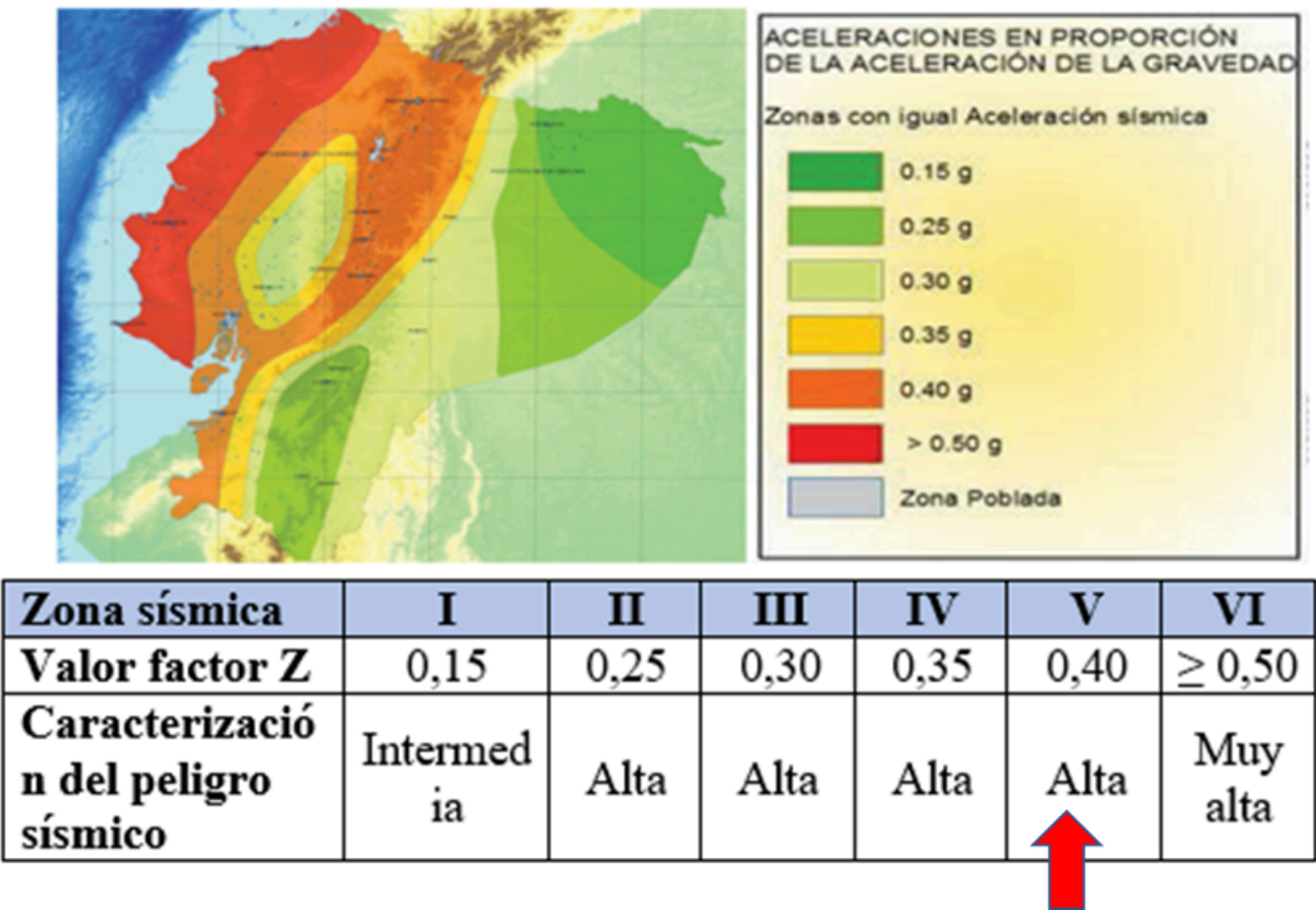
$\gamma_a = (\gamma_{es} - \gamma_{H2O}) * (1 - n)$

$\gamma_{es}$ : Peso específico de sedimentos  
 $ha$ : Altura de azolves  
 $K_p$ : Coeficiente de presiones pasivas del suelo  
 $n$ : Porosidad de sedimentos

$W_a = 14,88 \text{ t}$



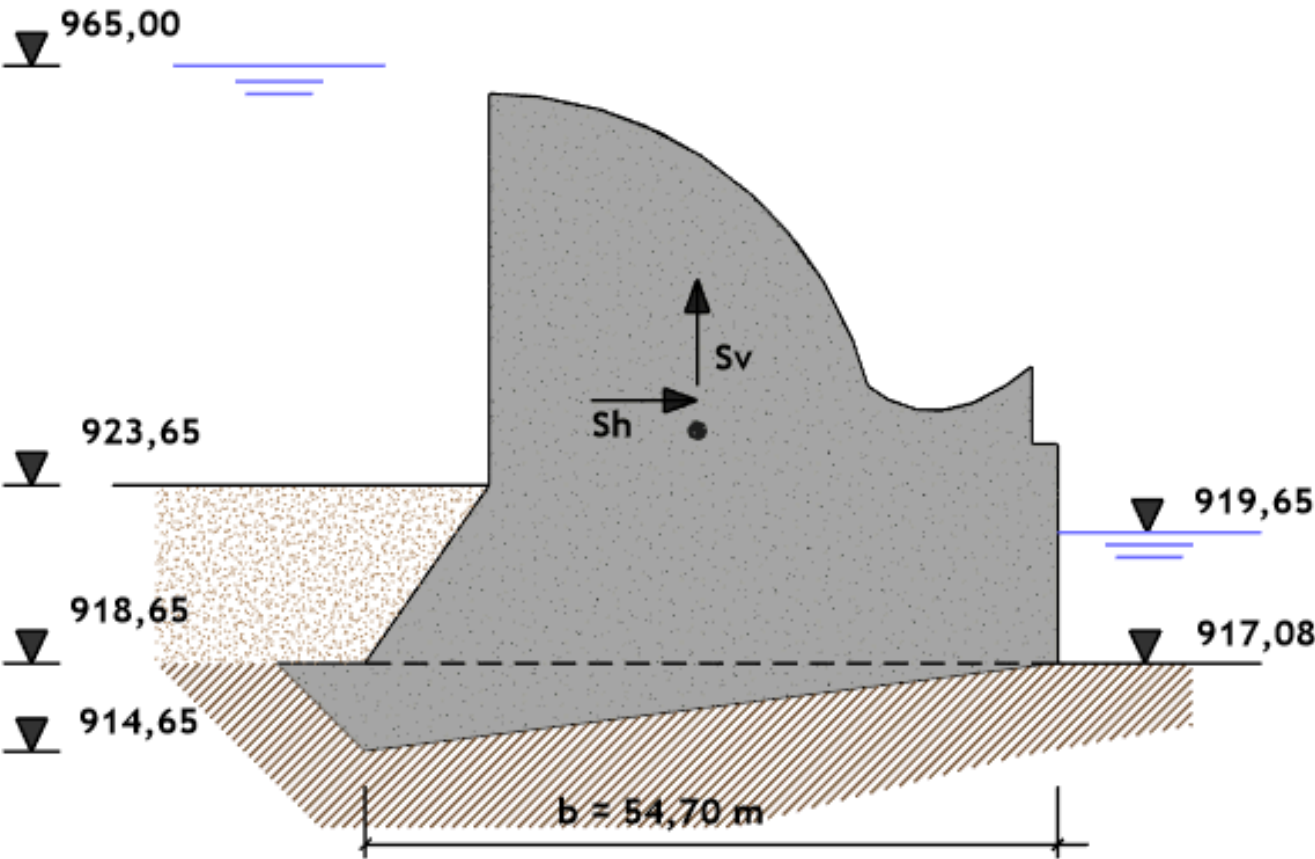
Componente horizontal y vertical



Comisión Federal de Electricidad, México

$$\alpha_h = \frac{Z}{1 + 2Z}$$
$$Z = 0,40g$$

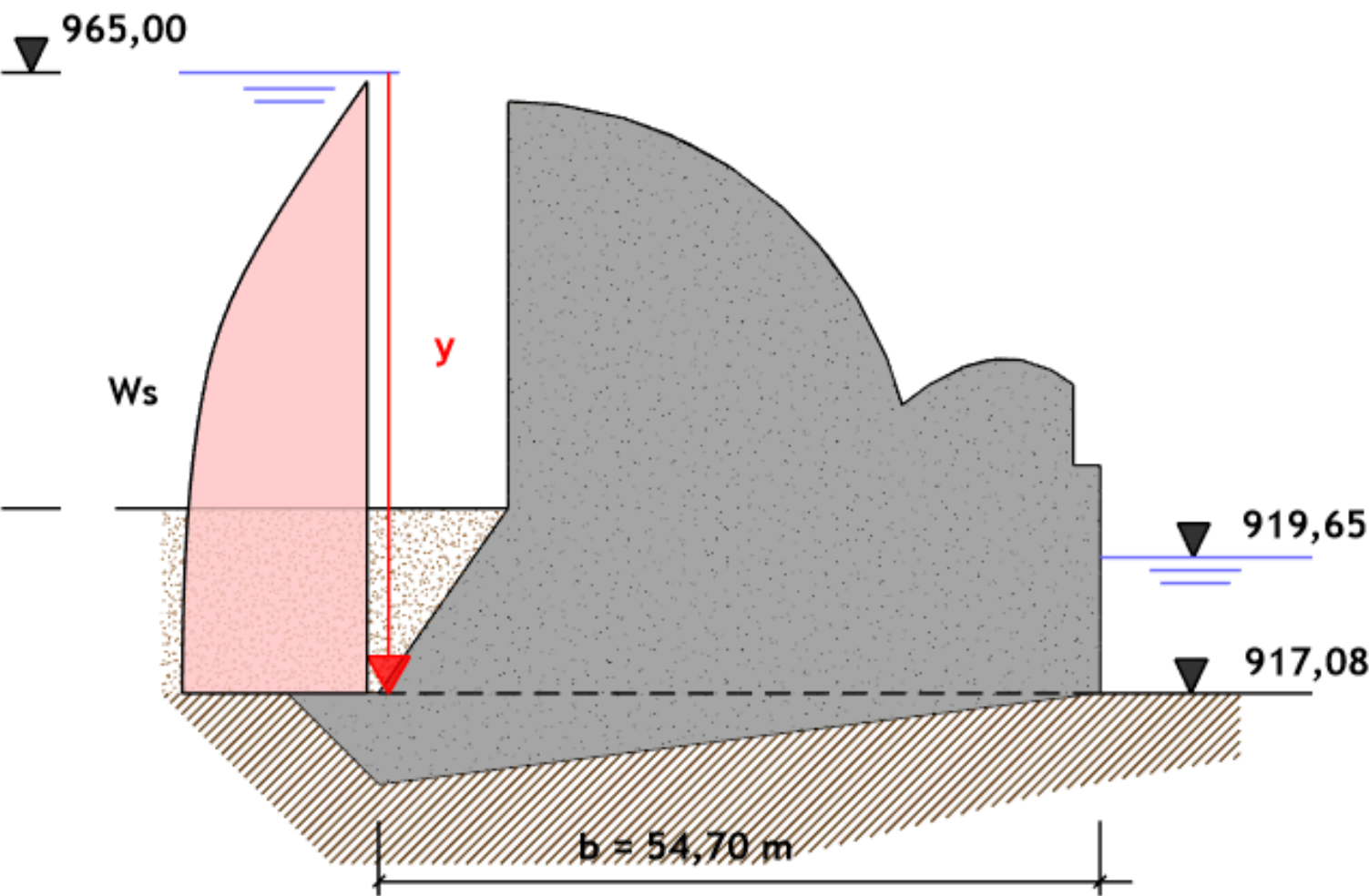
$$\alpha_v = \frac{2}{3} \alpha_h$$
$$G = 4209,45 t$$



$S_V = 623,62 t$

$S_H = 935,43 t$





United States Army Corps of Engineers (USACE)

$$W_s = \frac{2}{3} C_e \alpha_h * y * \sqrt{y * H}$$

$$C_e = \frac{0,817}{\sqrt{1 - 0,72 * \left(\frac{H}{304,8 t_e}\right)^2}}$$

$$\alpha_h = \frac{Z}{1 + 2Z}$$

Poliakov, 1983

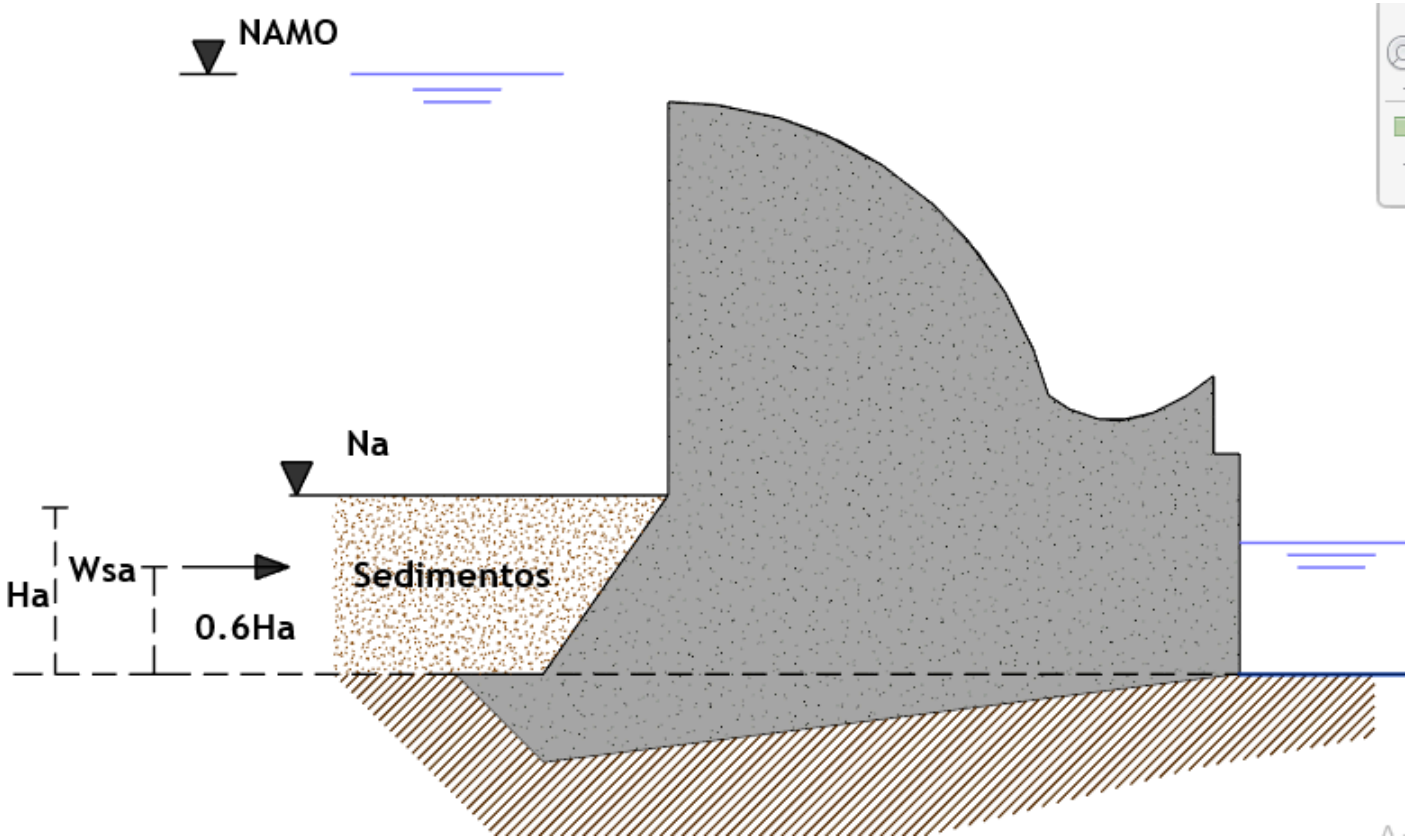
| Tipos de suelo (Norma SP 58,13330,2012) | Período natural de vibración te (s) |
|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| A (ROCAS)                               | 0,20 a 0,45                         |
| B (GRANULARES)                          | 0,40 a 0,80                         |
| C (SUELTOS SATURADOS)                   | 0,80 a 1,05                         |

$$W_s = 214,07 t$$

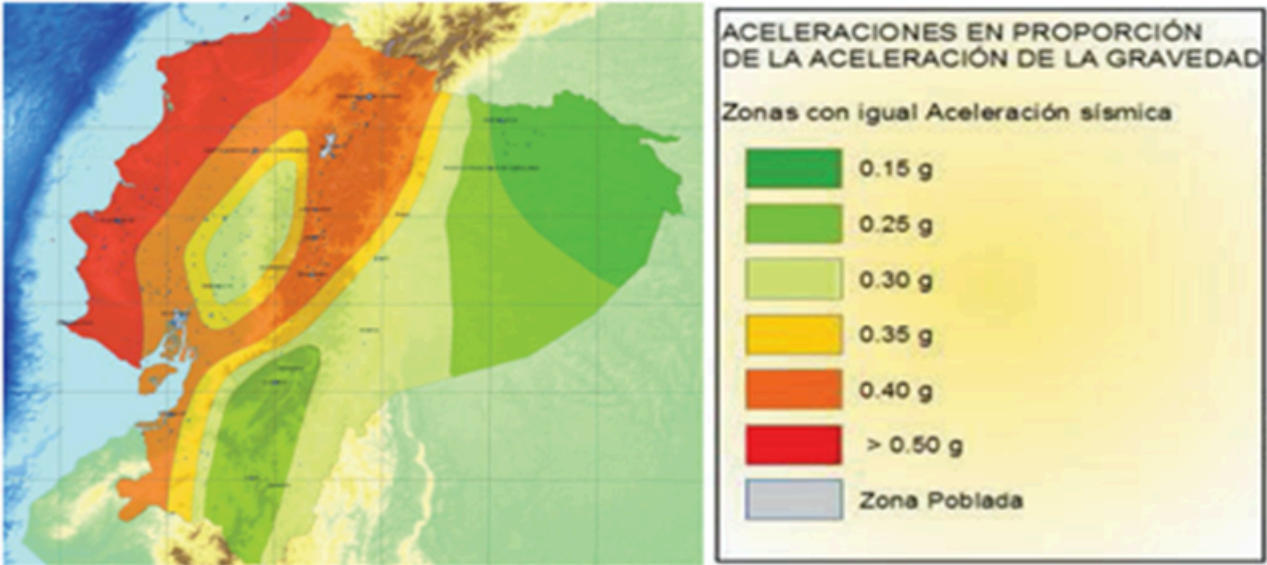


Comisión Federal de Electricidad, México

$$W_{sa} = 2,15 * \alpha_h * \gamma_a * H^2$$



$$W_{sa} = 14,21 \text{ t}$$

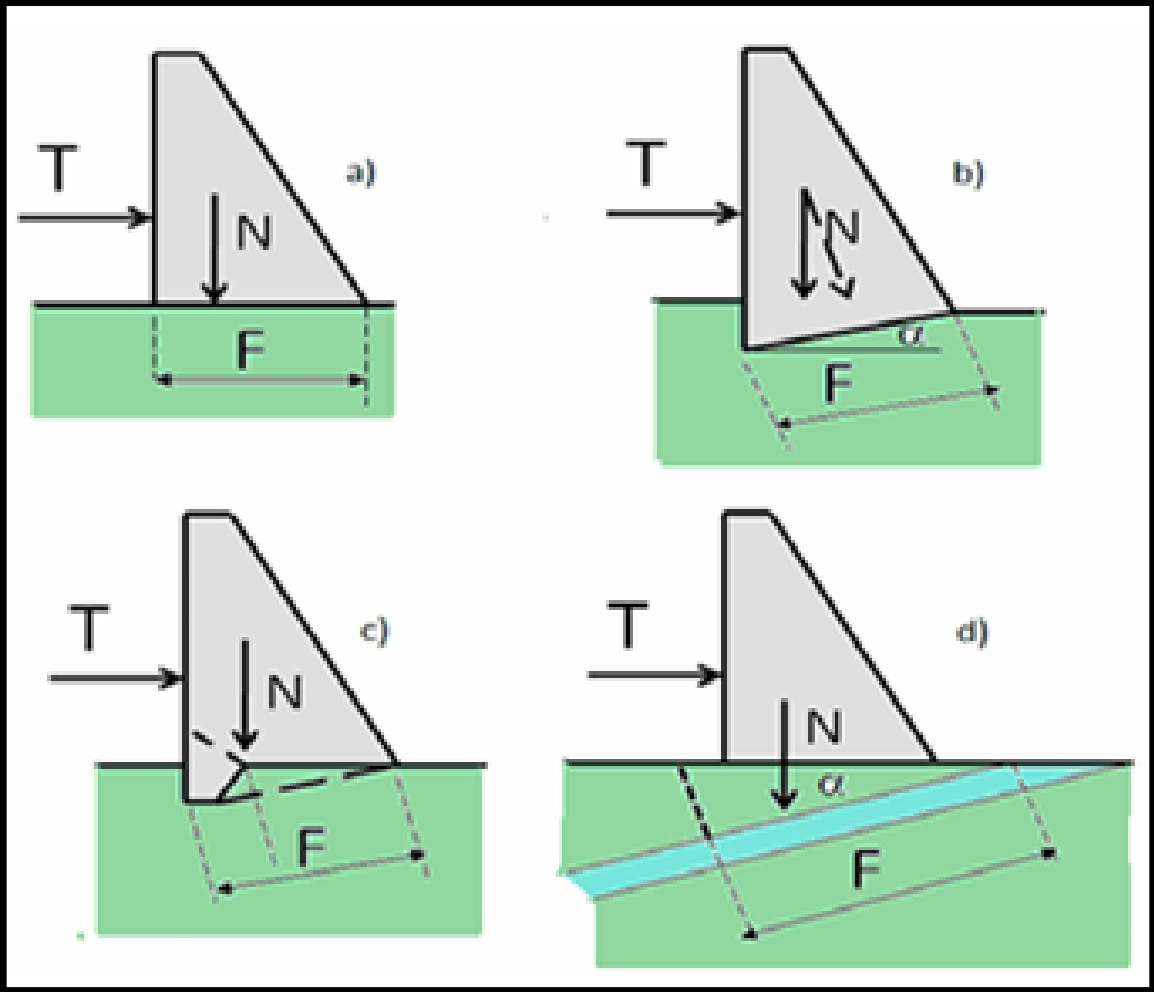


| Zona sísmica                        | I          | II   | III  | IV   | V    | VI       |
|-------------------------------------|------------|------|------|------|------|----------|
| Valor factor Z                      | 0,15       | 0,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | ≥ 0,50   |
| Caracterización del peligro sísmico | Intermedia | Alta | Alta | Alta | Alta | Muy alta |



$$\alpha_h = \frac{Z}{1 + 2Z}$$





$$k_{sd} \geq \frac{f N \cos(\alpha) + T \sin(\alpha) + c F}{T \cos(\alpha) + N \sin(\alpha)}$$

f: Coeficiente de fricción.  
c: Cohesión

CONDICIONES NORMALES [ N21 ]

Peso propio + Empuje hidrostático + Subpresión + Empuje de sedimentos + Ola máxima

CONDICIONES EXTREMAS [ E22 ]

Peso propio + Empuje hidrostático + Efecto sísmico de proyecto + Empuje de sedimentos + Ola sísmica+ Subpresión

| Condición de carga | Ubicación de la resultante en la base | FS mínimo al deslizamiento | Esfuerzo de concreto |              |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|--------------|
|                    |                                       |                            | Compresión           | Tracción     |
| Inusual            | Tercio medio                          | 2                          | 0,3f'c               | 0            |
| Inusual            | Medio central                         | 1,7                        | 0,5f'c               | 0,6f'c^(2/3) |
| Extrema            | Dentro de la base                     | 1,3                        | 0,9f'c               | 1,5f'c^(2/3) |



COMBINACIÓN NORMAL - FACTOR DE SEGURIDAD

| FUERZA                    |      | VALOR          |              |
|---------------------------|------|----------------|--------------|
|                           |      | Horizontal (T) | Vertical (N) |
| Fuerzas de presión agua 1 | W1   | 1267,56 +      |              |
| Fuerzas de presión agua 2 | W2   | 2,57 -         |              |
| Fuerzas de presión agua 3 | W3   |                | 123,75 +     |
| Fuerzas de presión agua 4 | W4   |                | 16,35 +      |
| Por peso de la estructura | G    |                | 4209,46 +    |
| Empuje                    | E    |                | 237,20 -     |
| Subpresión                | Wf   |                | 232,56 -     |
| Presión de azolves        | Wa   | 14,88 +        |              |
| Presión máxima de ola     | Pmax | 8,12 +         |              |
| TOTAL                     |      | 1287,99        | 3879,79      |

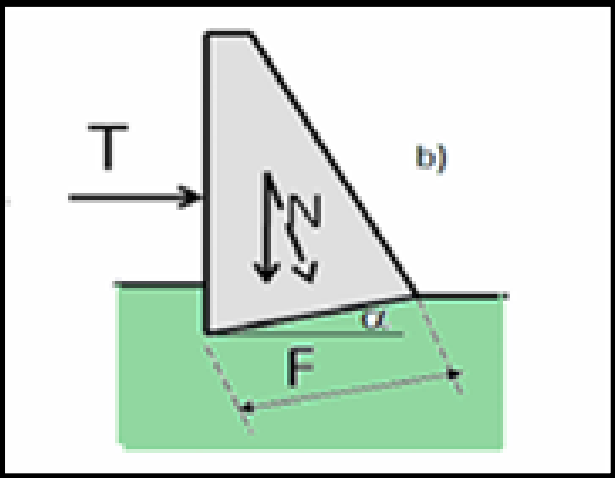
\*Unidades en toneladas

| TIPO DE ROCA                                                                                                                     | f    | C (Mpa) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|
| Grandes macizos rocosos, en capas, estratos grandes no fisurados, con resistencia a la compresión mayor a 500 kg/cm2 (Rc >50Mpa) | 0,95 | 0,4     |
| Grandes macizos rocosos, en capas, estratos grandes medio fisurados y poco meteorizados (Rc > 50 Mpa)                            | 0,85 | 0,3     |
| Grandes bastante fisuradas (R = 15 a 50 Mpa), poco fisuradas y poco meteorizadas (R=5 a 15 Mpa)                                  | 0,75 | 0,2     |
| Rocas medias blandas, rocas en capas delgadas y meteorizadas (R > 15 Mpa)                                                        | 0,70 | 0,1     |

CONDICIONES NORMALES (N21)

Peso propio + Empuje hidrostático + Subpresión  
+Empuje de sedimentos + Ola máxima

| Combinaciones | N [t]   | T [t]   | f    | c [t/m2] | a | Ksd  | Condición | Condición |
|---------------|---------|---------|------|----------|---|------|-----------|-----------|
| N21           | 3879,79 | 1287,99 | 0,85 | 30       | 3 | 3,36 | > 2       | OK        |





COMBINACIÓN NORMAL

| Combinación N21           |      |           |           |               |
|---------------------------|------|-----------|-----------|---------------|
| FUERZA                    |      | Valor [t] | Brazo [m] | Momento [t.m] |
| Fuerzas de presión agua 1 | W1   | 1267,56   | -16,78    | -21273,90     |
| Fuerzas de presión agua 2 | W2   | 2,57      | 0,86      | 2,20          |
| Fuerzas de presión agua 3 | W3   | 123,75    | 24,90     | 3080,76       |
| Fuerzas de presión agua 4 | W4   | 16,35     | 25,71     | 420,41        |
| Por peso de la estructura | G    | 4209,46   | 2,63      | 11070,87      |
| Empuje                    | E    | 237,20    | 0,00      | 0,00          |
| Subpresión                | Wf   | 232,56    | -29,81    | -6931,51      |
| Presión de azolves        | Wa   | 14,88     | -1,67     | -24,79        |
| Presión máxima de ola     | Pmax | 8,12      |           | -343,60       |
| Momento total             |      |           |           | -13999,57     |

$$\sigma_{y1,2} = \frac{\sum V}{b} \pm \frac{\sum M}{b^2}$$

| Esfuerzo sentido vertical<br>Combinación N21 |                       |
|----------------------------------------------|-----------------------|
| $\sigma_{y1}$<br>t/m2                        | $\sigma_{y2}$<br>t/m2 |
| 42,86                                        | 99,00                 |

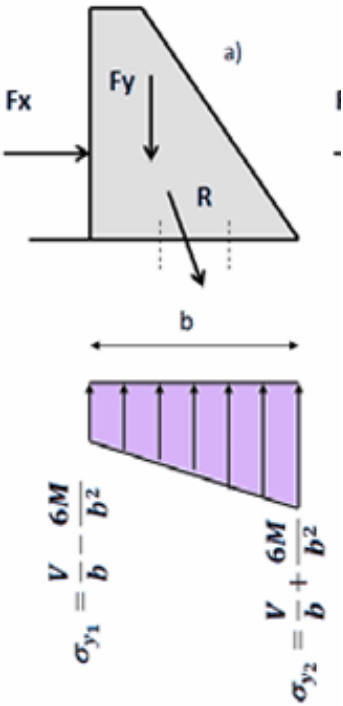
$$e = \frac{\sum M - 13999,6}{\sum N \cdot 3879,79}$$

$$e = -3.61 \text{ m}$$

$$x = \frac{54,70 \text{ m}}{2} + (-3.61 \text{ m})$$

$$x = 23,74 \text{ m}$$

$18,23 \text{ m} \leq 23,74 \text{ m} \leq 36,47 \text{ m} \rightarrow$  Cumple condición tercio medio



| Condición de carga | Ubicación de la resultante en la | Esfuerzo de concreto |          |
|--------------------|----------------------------------|----------------------|----------|
|                    |                                  | Compresión           | Tracción |
| Inusual            | Tercio medio                     | 0,3f'c               | 0        |

|                        |            |
|------------------------|------------|
| f'c                    | 350 kg/cm2 |
| Requerido              | 1050 t/m2  |
| Obtenido               | 99 t/m2    |
| Cumple condición comp. |            |



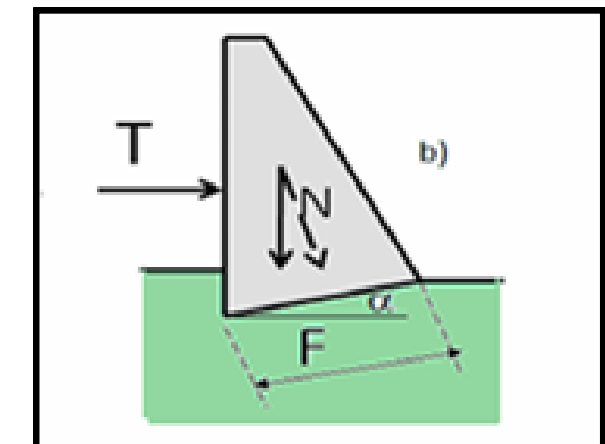
### COMBINACIÓN EXTREMA - FACTOR DE SEGURIDAD

| FUERZA                        |      | VALOR          |              |
|-------------------------------|------|----------------|--------------|
|                               |      | Horizontal (T) | Vertical (N) |
| Fuerzas de presión agua 1     | W1   | 1267,56 +      |              |
| Fuerzas de presión agua 2     | W2   | 2,57 -         |              |
| Fuerzas de presión agua 3     | W3   |                | 123,75 +     |
| Fuerzas de presión agua 4     | W4   |                | 16,35 +      |
| Por peso de la estructura     | G    |                | 4209,46 +    |
| Empuje                        | E    |                | 237,20 -     |
| Subpresión                    | Wf   |                | 232,56 -     |
| Presión de azolves            | Wa   | 14,88 +        |              |
| Presión máxima de ola         | Pmax | 8,12 +         |              |
| Fuerza sísmica vertical       | Sv   |                | 623,62 -     |
| Fuerza sísmica horizontal     | Sh   | 935,43 +       |              |
| Fuerza hidrodinámica.         | Ws   | 214,07 +       |              |
| Fuerza sísmica por sedimentos | Wsa  | 14,21 +        |              |
| TOTAL                         |      | 2451,71        | 3256,17      |

| TIPO DE ROCA                                                                                                                                  | f    | C (Mpa) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|---------|
| Grandes macizos rocosos, en capas, estratos grandes no fisurados, con resistencia a la compresión mayor a 500 kg/cm <sup>2</sup> (Rc > 50Mpa) | 0,95 | 0,4     |
| Grandes macizos rocosos, en capas, estratos grandes medio fisurados y poco meteorizados (Rc > 50 Mpa)                                         | 0,85 | 0,3     |
| Grandes bastante fisuradas (R = 15 a 50 Mpa), poco fisuradas y poco meteorizadas (R=5 a 15 Mpa)                                               | 0,75 | 0,2     |
| Rocas medias blandas, rocas en capas delgadas y meteorizadas (R > 15 Mpa)                                                                     | 0,70 | 0,1     |

#### CONDICIONES EXTREMAS [ E22 ]

Peso propio + Empuje hidrostático  
+ Efecto sísmico de proyecto +  
Empuje de sedimentos + Ola  
sísmica



| Combinaciones | N [t]   | T [t]   | f    | c [t/m <sup>2</sup> ] | a | Ksd  | Condición | Condición |
|---------------|---------|---------|------|-----------------------|---|------|-----------|-----------|
| E22           | 3256,17 | 2443,59 | 0,85 | 30                    | 0 | 1,74 | > 1,30    | OK        |



COMBINACIÓN EXTREMA

| Combinación E22               |      |           |           |               |
|-------------------------------|------|-----------|-----------|---------------|
| FUERZA                        |      | Valor [t] | Brazo [m] | Momento [t.m] |
| Fuerzas de presión agua 1     | W1   | 1267,56   | -16,78    | -21273,9      |
| Fuerzas de presión agua 2     | W2   | 2,57      | 0,86      | 2,20          |
| Fuerzas de presión agua 3     | W3   | 123,75    | 24,90     | 3080,76       |
| Fuerzas de presión agua 4     | W4   | 16,35     | 25,71     | 420,41        |
| Por peso de la estructura     | G    | 4209,46   | 2,63      | 11070,87      |
| Subpresión                    | Wf   | 232,56    | -29,81    | -6931,51      |
| Presión de azolves            | Wa   | 14,88     | -1,67     | -24,79        |
| Fuerza sísmica por sedimentos | Wsa  | 14,21     | -3,00     | -42,64        |
| Presión máxima de ola         | Pmax | 8,12      |           | -343,60       |
| Fuerza hidrodinámica.         | Ws   | 214,07    | -21,54    | -4611,17      |
| Fuerza sísmica horizontal     | Sh   | 935,43    | -14,70    | -13750,89     |
| Fuerza sísmica vertical       | Sv   | 623,62    | -2,63     | -1640,13      |
| Empuje                        | E    | 237,20    | 0,00      | 0,00          |
| Momento total                 |      |           |           | -34044,39     |

$$\sigma_{y1,2} = \frac{\sum V}{b} \pm \frac{\sum M}{b^2}$$

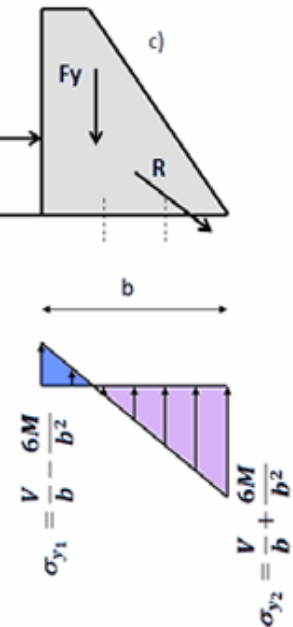
$$e = \frac{\sum M}{\sum N} = \frac{-34.044,39 \text{ t.m}}{3256,17 \text{ t}}$$

$$e = -10,46 \text{ m}$$

$$x = \frac{54,70 \text{ m}}{2} + (-10,46 \text{ m}) = 16,89 \text{ m}$$

$$\frac{F}{3} \leq x \leq 2 * \frac{F}{3} \rightarrow 0,00 \text{ m} \leq 16,89 \text{ m} \leq 54,70 \text{ m} \rightarrow \text{Cumple condición}$$

| Esfuerzo vertical<br>Combinación E21 |               |
|--------------------------------------|---------------|
| $\sigma_{y1}$                        | $\sigma_{y2}$ |
| t/m2                                 | t/m2          |
| -8,74                                | 127,80        |



| Condición de carga | Ubicación de la resultante en la base | FS mínimo al deslizamiento | Esfuerzo de concreto |              |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------|--------------|
|                    |                                       |                            | Compresión           | Tracción     |
| Inusual            | Tercio medio                          | 2                          | 0,3f'c               | 0            |
| Inusual            | Medio central                         | 1,7                        | 0,5f'c               | 0,6f'c^(2/3) |
| Extrema            | Dentro de la base                     | 1,3                        | 0,9f'c               | 1,5f'c^(2/3) |

| Compresión             |             | Tracción                  |             |
|------------------------|-------------|---------------------------|-------------|
| f'c                    | 350 kg/cm2  | f'c                       | 350 kg/cm2  |
| Requerido              | 3150 t/m2   | Requerido                 | 744,97 t/m2 |
| Obtenido               | 127,80 t/m2 | Obtenido                  | 8,74 t/m2   |
| Cumple condición comp. |             | Cumple condición tracción |             |



HEC- RAS se basa en las ecuaciones de Saint-Venant, las cuales constituyen un sistema compuesto por la ecuación de continuidad y la ecuación de cantidad de movimiento

HEC-RAS utiliza el método de Onda Difusa, este omite los términos de aceleración local y convectiva

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = 0$$

Donde

$\frac{\partial V}{\partial t}$  : Terminio de aceleración local

$V \frac{\partial V}{\partial x}$  : Término de aceleración convectiva

$g \frac{\partial y}{\partial x}$  : terminio de fuerza de presión

$g(S_0 - S_f)$  : Término de aceleración gravitacional y fricción



### Limitacion del modelo

El software simula la propagación de la onda de inundación a partir de la topografía, el caudal y los parámetros geométricos de la brecha

No realiza un análisis estructural, porque no evalúa esfuerzos, deformaciones ni mecanismos internos de falla.

Por lo tanto, los resultados obtenidos constituyen una simulación hidráulica aplicada

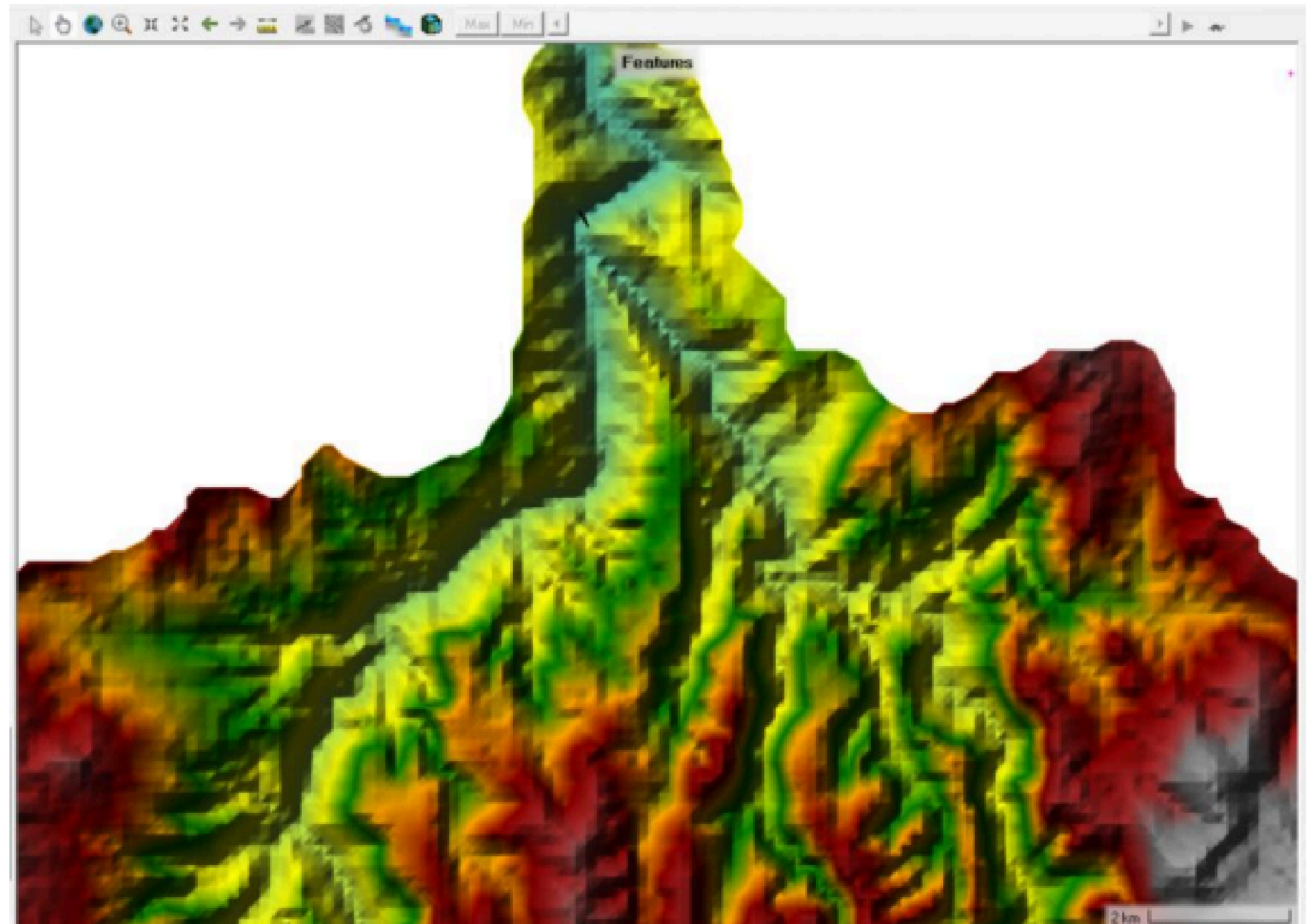
El estudio no constituye una validación experimental debido a que no existen antecedentes en el país con lo que se podría comparar los resultados obtenidos



### Preparación del Modelo Digital de Terreno (MDT)

En el modelo, se consideró información cartográfica de cartas topográficas a escala 1:50.000, obtenidas del Instituto Geográfico Militar del Ecuador

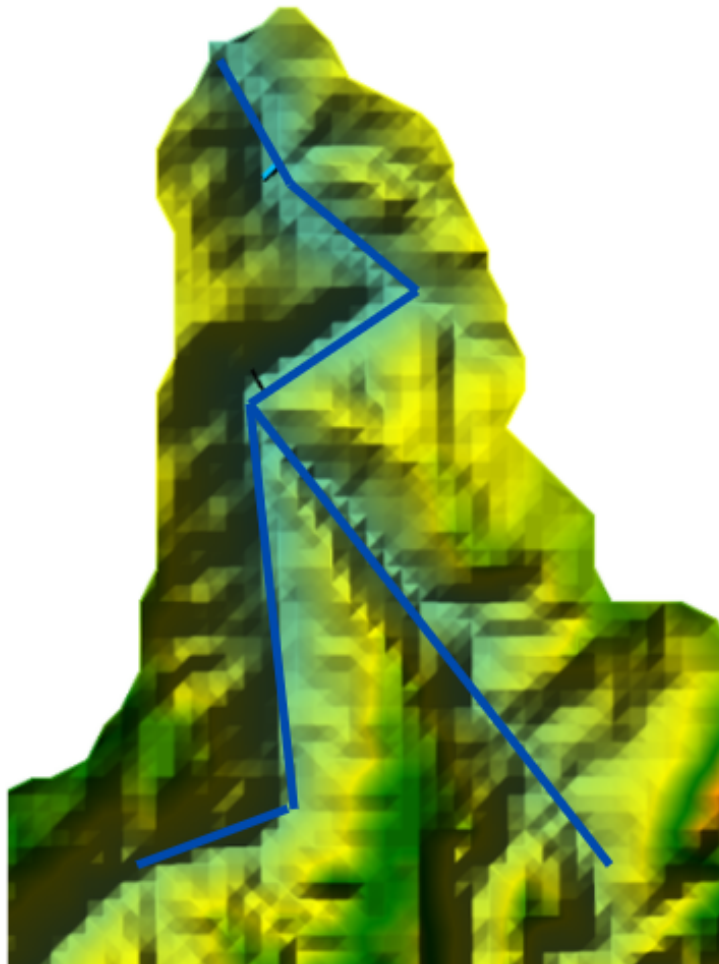
La capa fue procesada utilizando sistemas de información geográfica



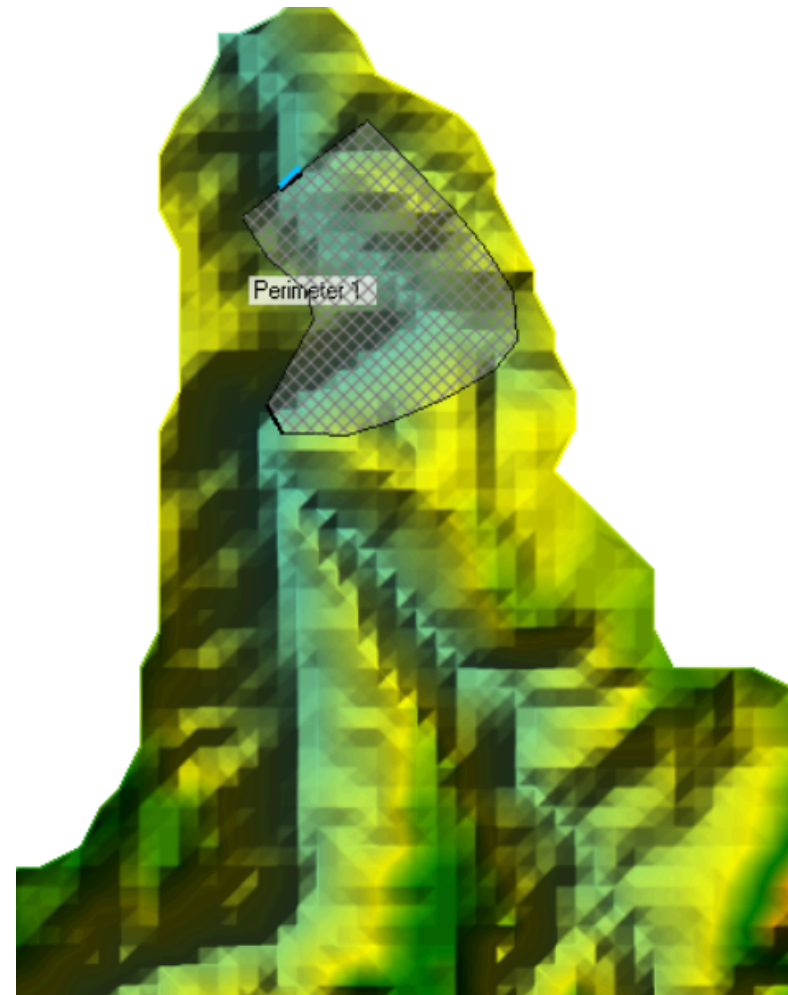


### Configuración de condiciones iniciales y de contorno

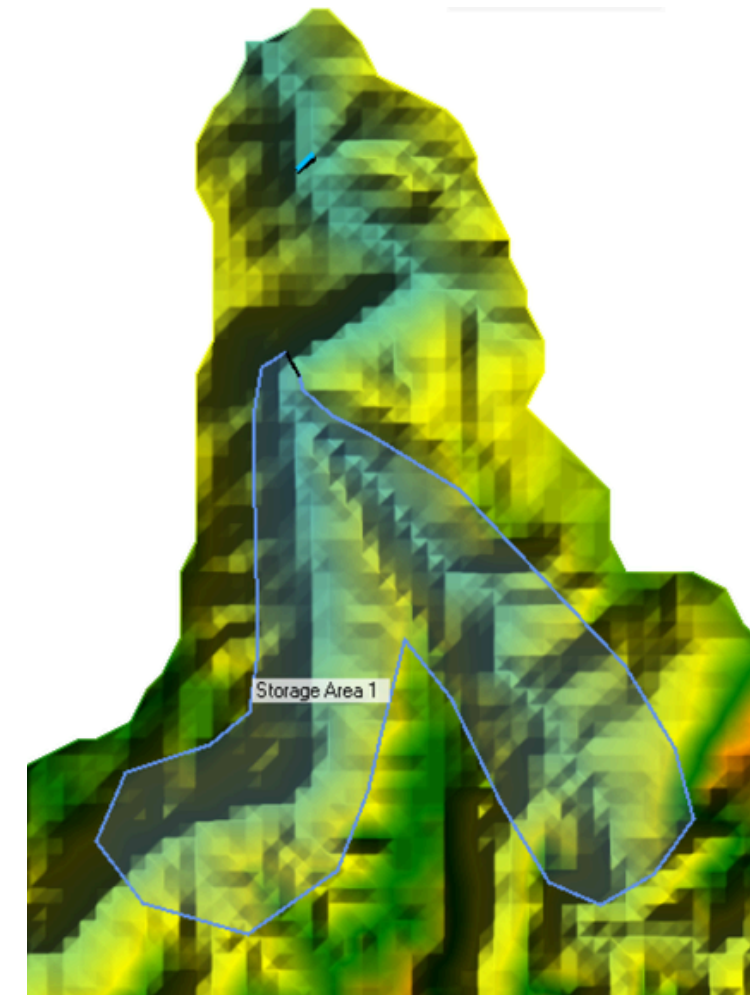
Delimitación del cauce principal del río y de la zona de inundación



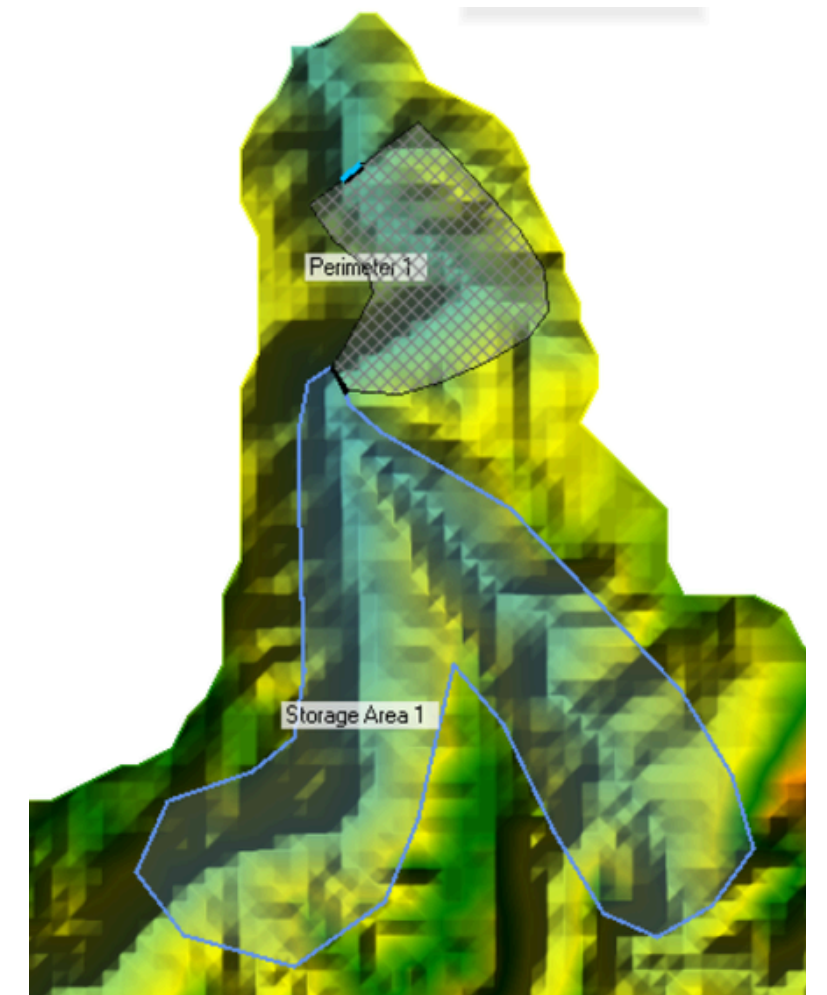
Condición inicial en el área inundable ubicada aguas abajo de la presa



Como condición límite, se definió el área del embalse del proyecto



Se estableció un mallado conectado al área de almacenamiento y la zona de inundación.







Dimensiones de la presa

Longitud de coronación: 161,4 m

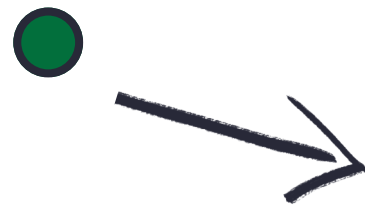
ancho de la base: 54,70 m

ancho de la corona: 21,7 m

altura de la presa: 60 m

La base de la presa se encuentra en la cota 920 m s.n.m.

### Datos de entrada

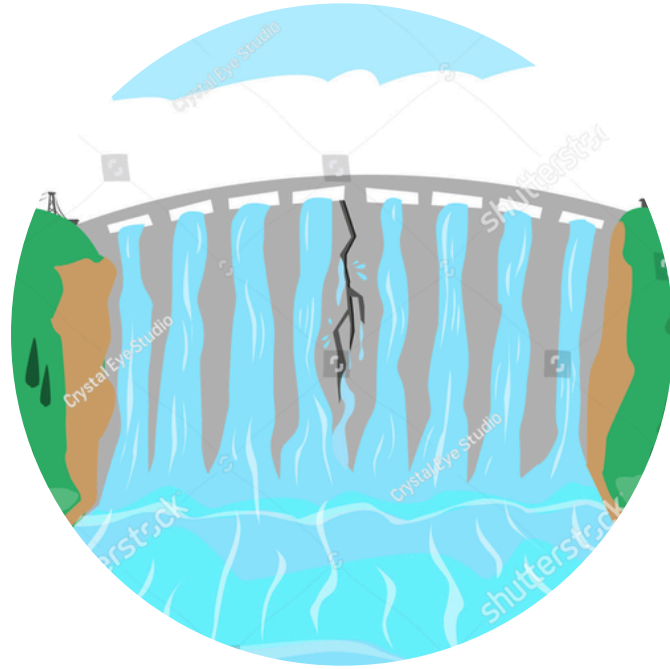


El hidrograma que se ingresó en el software corresponde a los datos de salida del software HEC-HMS

El caudal pico obtenido es de 742.4 m<sup>3</sup>/s distribuidos en 24 horas



### Tipos de mecanismos de falla según HEC/RAS



#### **Overtopping.**

Ocurre cuando el nivel del embalse supera la cota de coronación debido a crecidas extraordinarias, a una capacidad insuficiente del vertedero



#### **Piping.**

Ocurre cuando el flujo de agua a través del cuerpo de la presa arrastra partículas finas, formando conductos internos



#### **Nivel máximo normal (NMN)**

Es el máximo nivel de retención de agua en el embalse cuando todos los elementos de desagüe se encuentran cerrados



### Brecha de rotura

En el caso de presas a gravedad, la forma de la brecha se considera rectangular hasta el fondo del cauce, con un ancho mayor o igual al tercio de la longitud de la coronación. La ubicación de la brecha está en el sector más vulnerable de la presa asociado a la zona central. El tiempo de rotura se asume entre 10 y 15 minutos

Breach Method:

Center Station:

Final Bottom Width:

Final Bottom Elevation:

Left Side Slope:

Right Side Slope:

Breach Weir Coef:

Breach Formation Time (hrs):

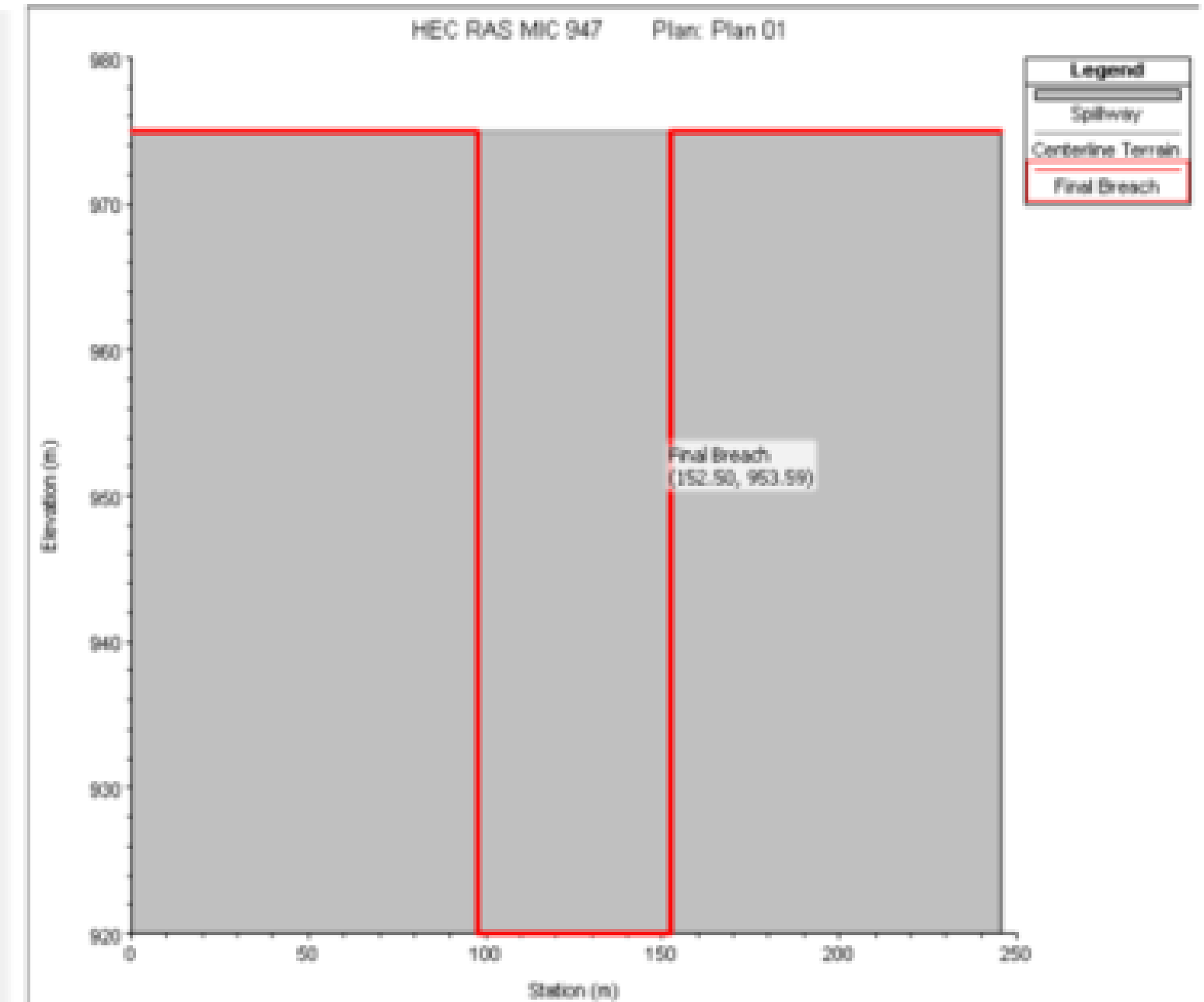
Failure Mode:

Piping Coefficient:

Initial Piping Elev:

Trigger Failure at:

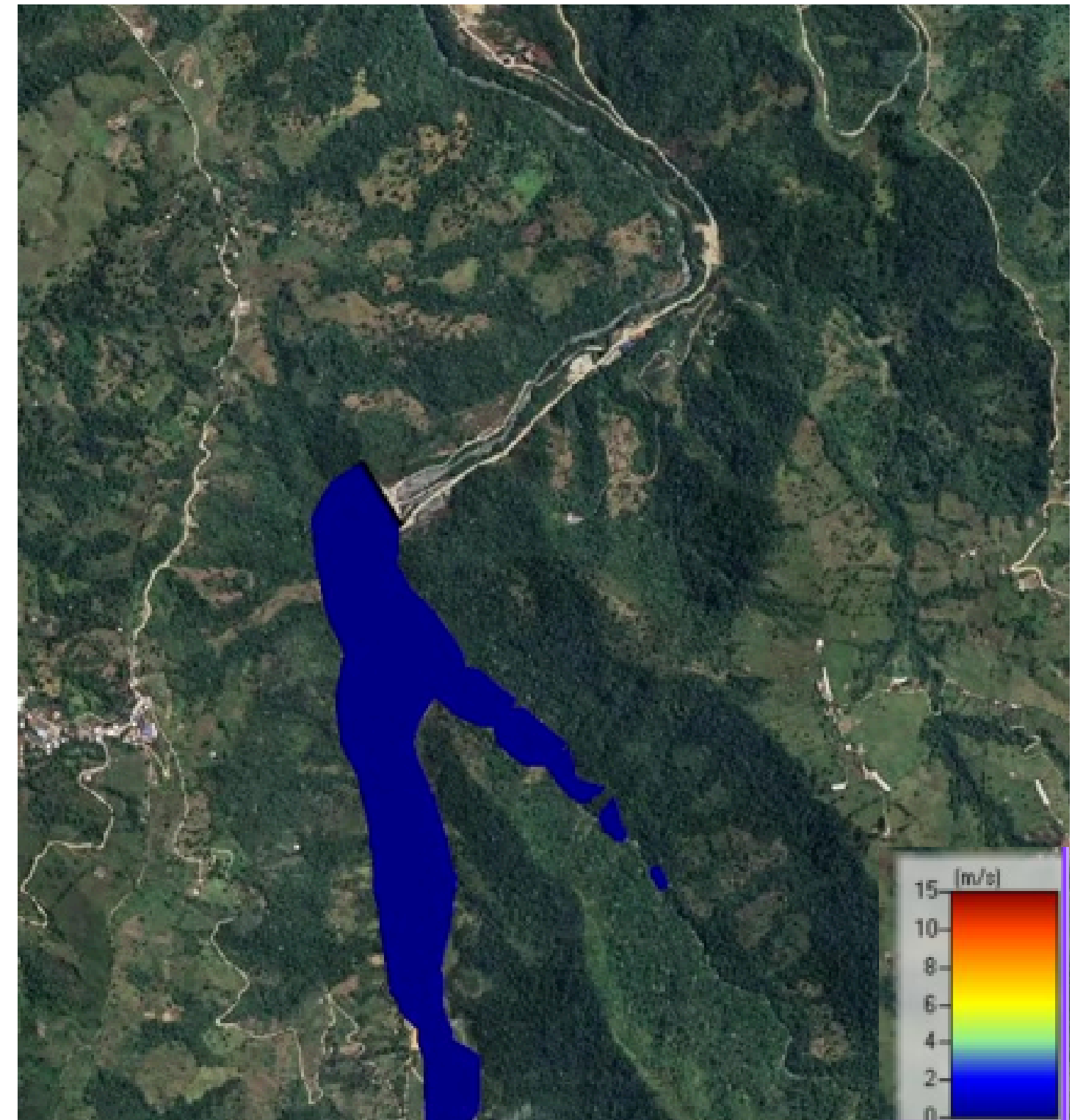
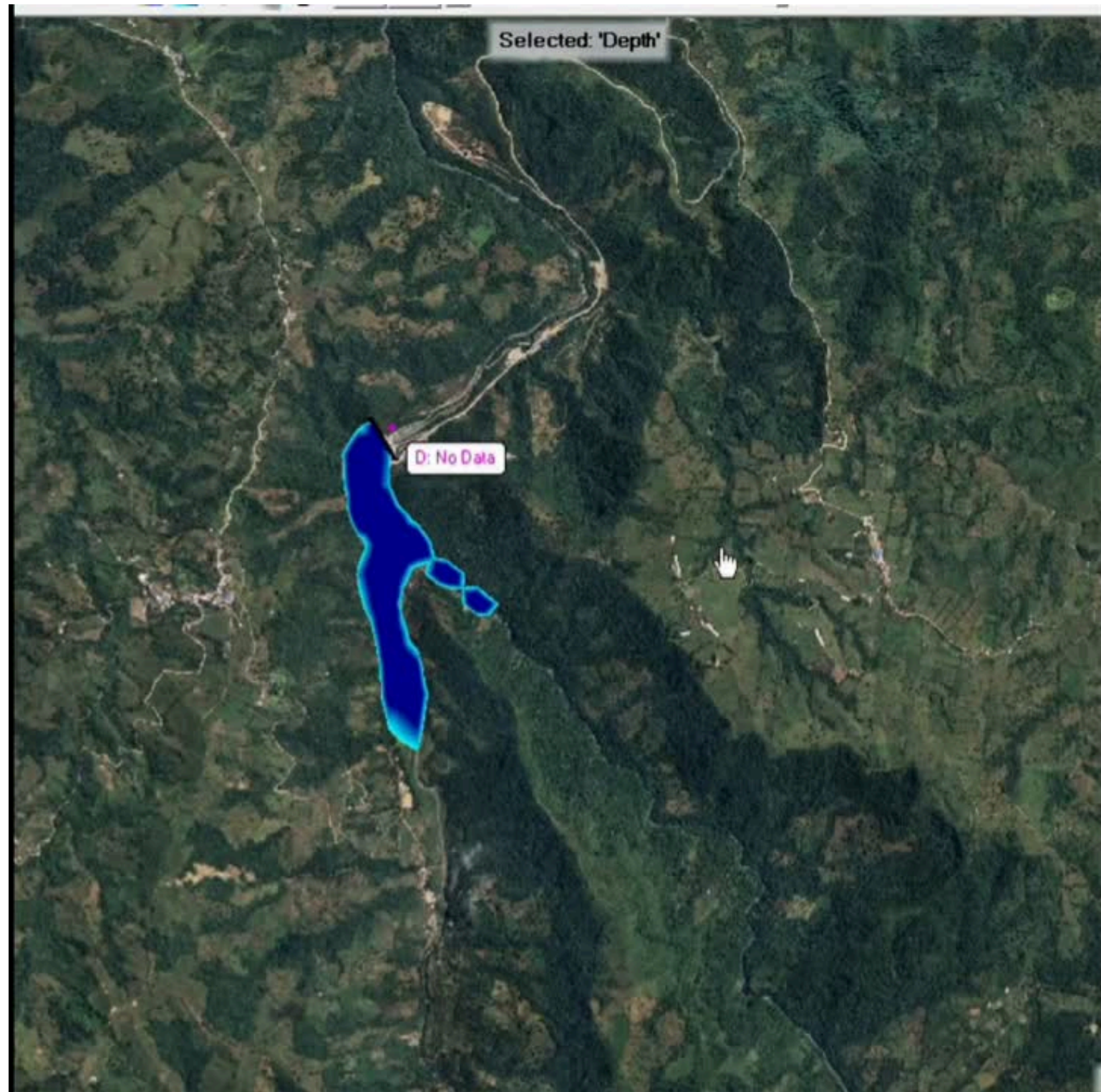
Starting WS:



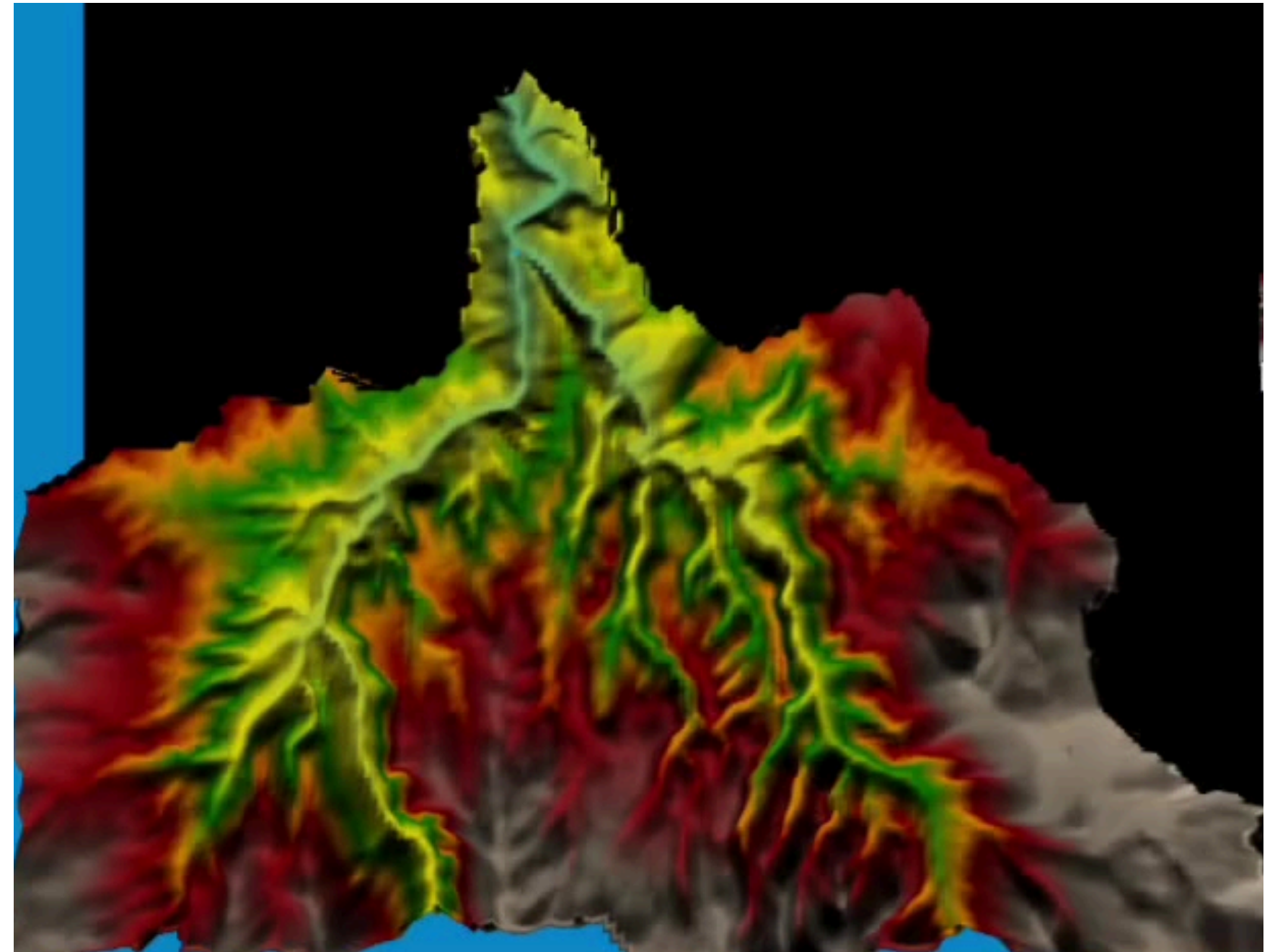
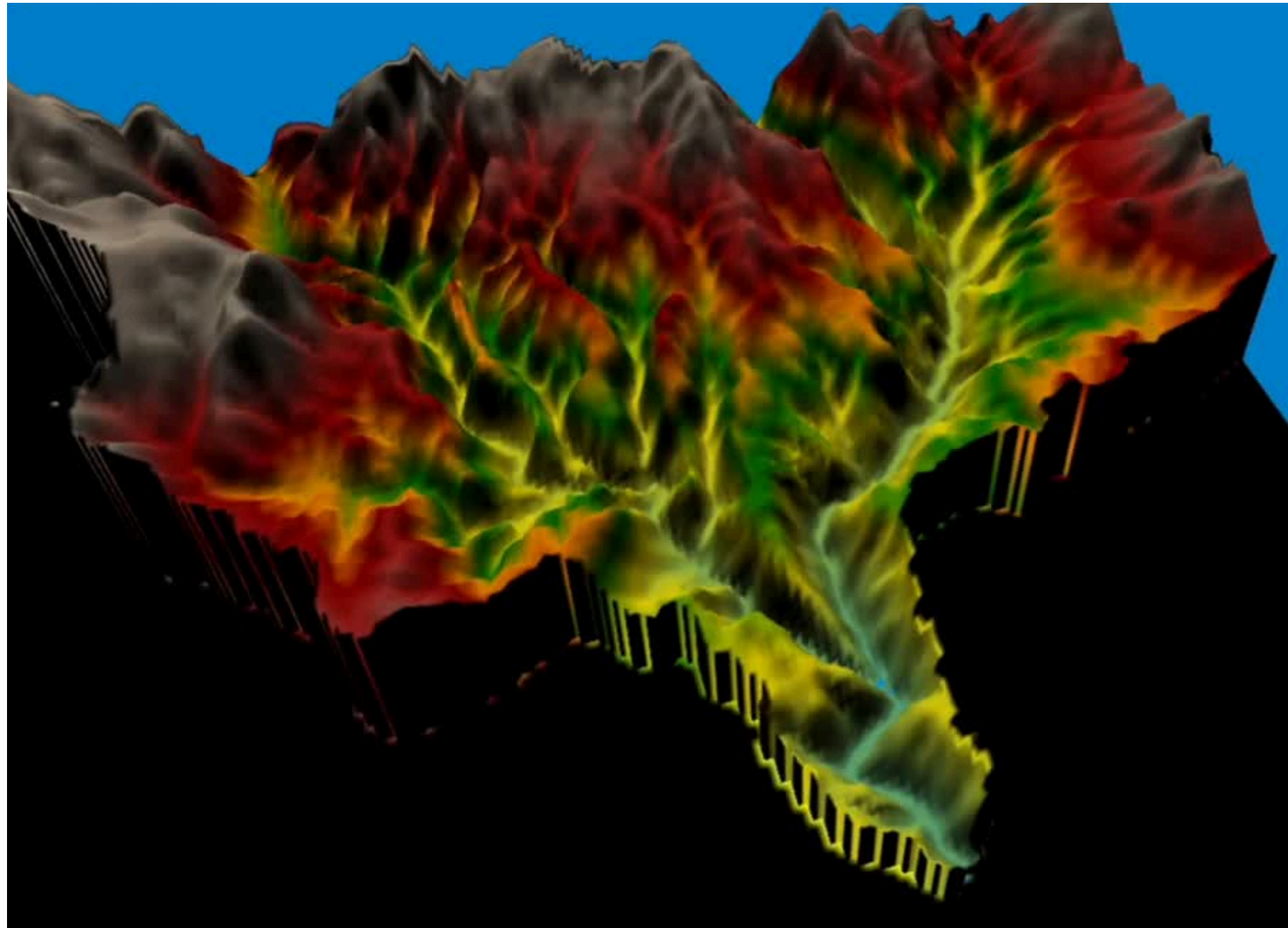
### Criterios de simulación

- El escenario de rotura fue incorporado en HEC-RAS dentro del régimen de flujo no permanente, permitiendo la generación automática del hidrograma de salida asociado a la falla de la presa
- Se seleccionó un intervalo de cálculo temporal acorde con la resolución espacial del modelo y la velocidad de propagación esperada de la onda de inundación.



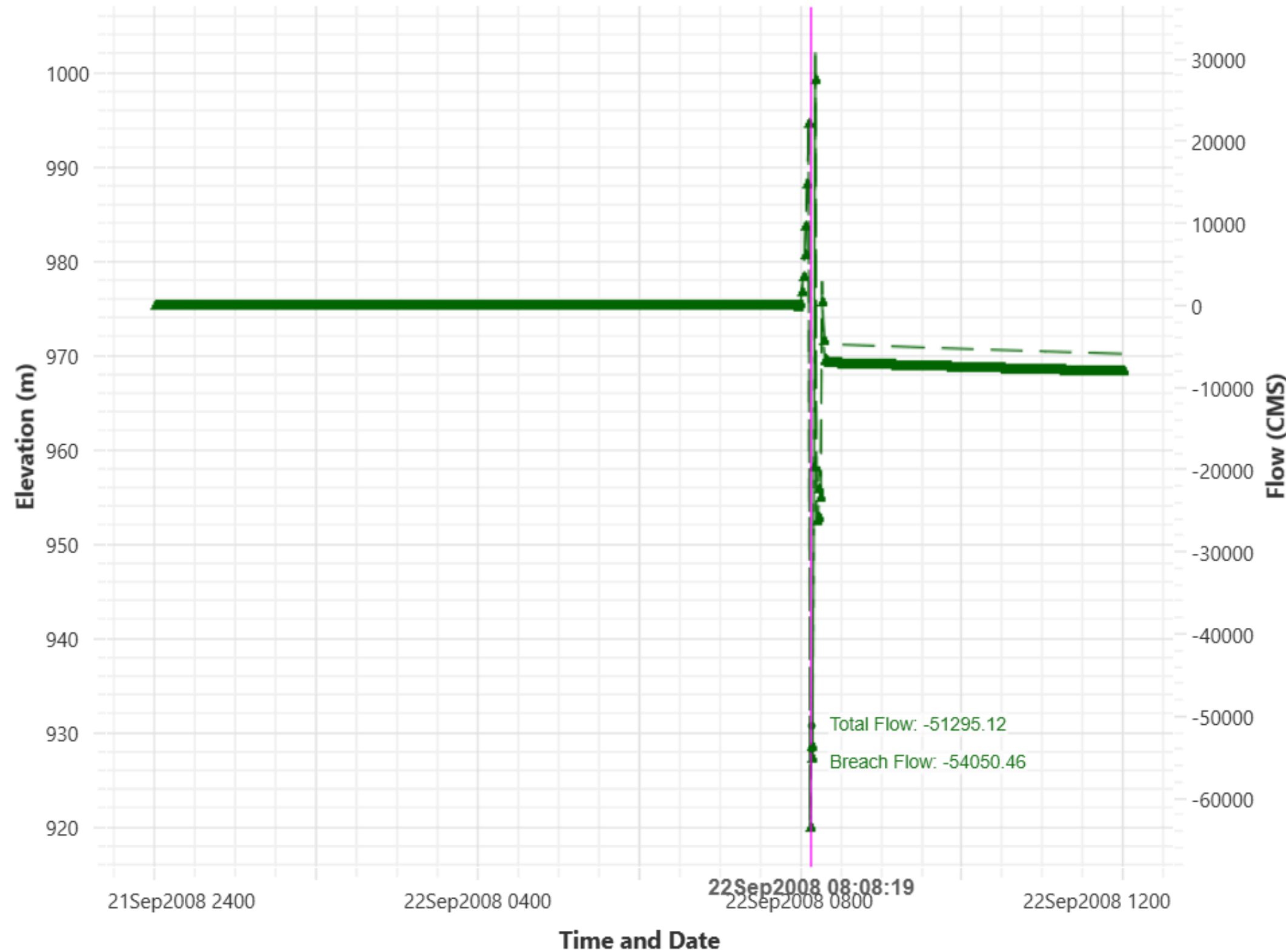












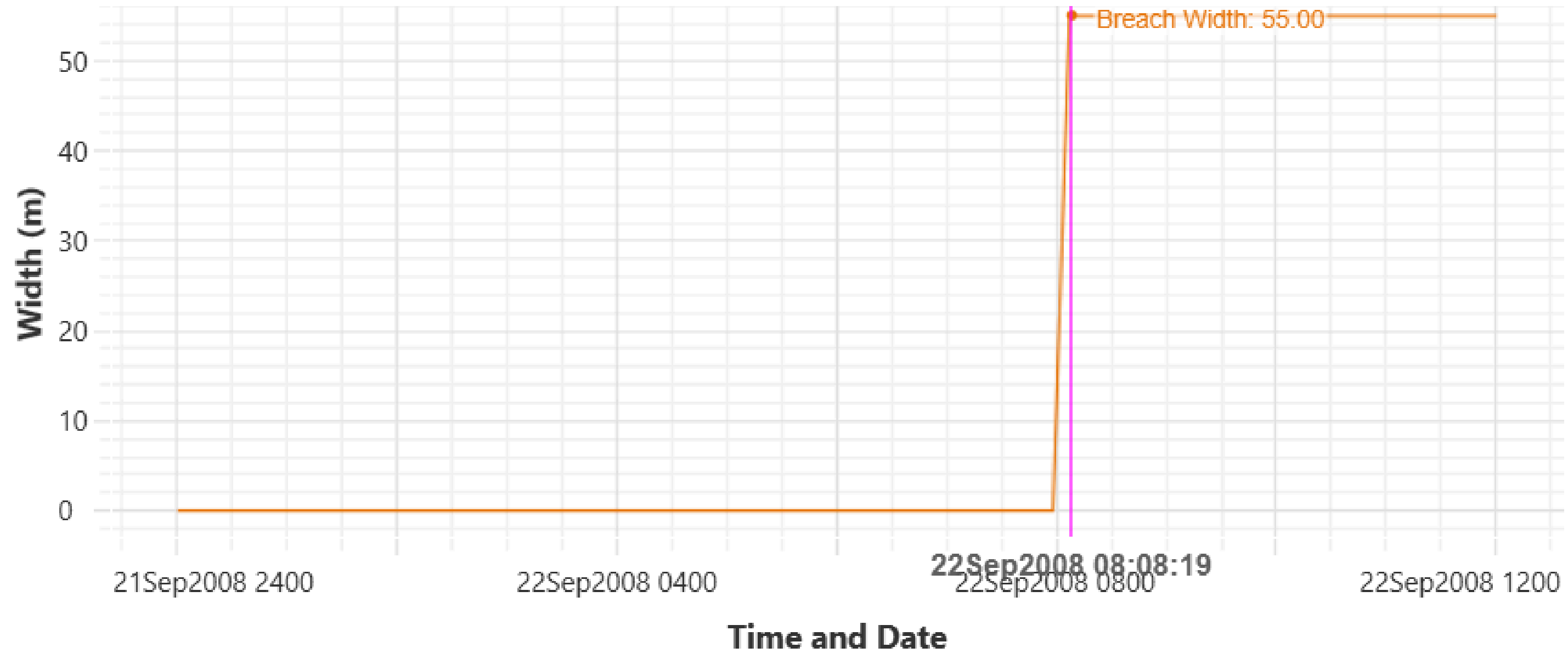
### Hidrograma de salida

La rotura total de la presa se produce a las 07h55

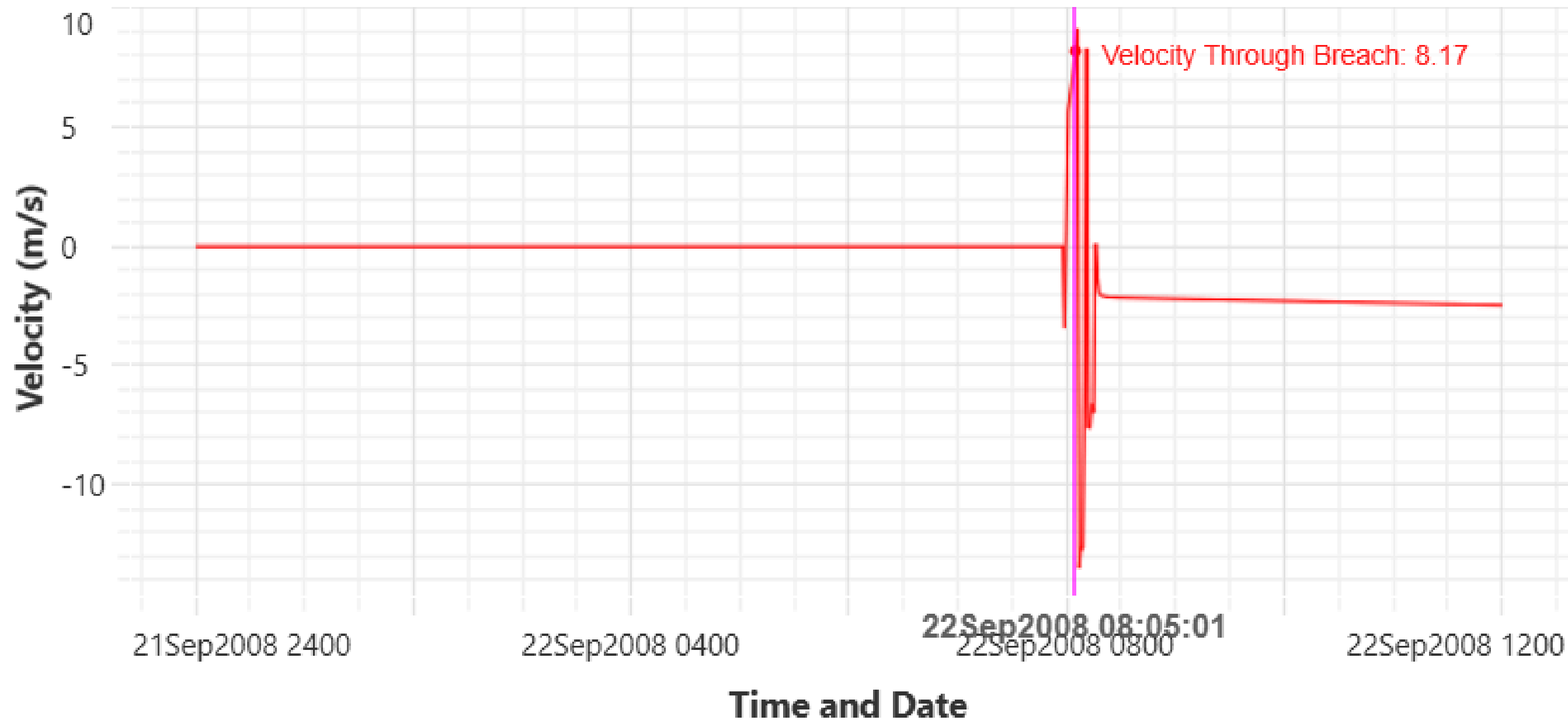
El caudal que atraviesa la brecha llega a 54.490 m<sup>3</sup>/s, lo que refleja una liberación súbita



### Formación de la brecha



### Velocidades máximas del flujo



En el instante crítico del evento, la velocidad a través de la brecha alcanza 8,65 m/s, lo que evidencia un flujo altamente turbulento y de elevado potencial erosivo.



### Tiempos de llegada de la onda de inundación

$$V = F_m \cdot V_{max}$$

$$V = 0,65 \cdot 8,65 = 5,62 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{3000}{5,62} = 534 \text{ s} \approx 9 \text{ minutos}$$

Donde:

$V$  = Velocidad media

$F_m$  = Factor de minoración [0,6-0,7]

$V_{max}$  = Velocidad máxima

Se estima que la onda de avenida estaría en un intervalo aproximado de 9 a 11 minutos

### Profundidades de inundación

Una vez iniciado el proceso de rotura, el nivel de la lámina de agua alcanza cotas máximas del orden de 974–975 m.

El nivel de inundación se encuentra alrededor de la cota 938–940 m

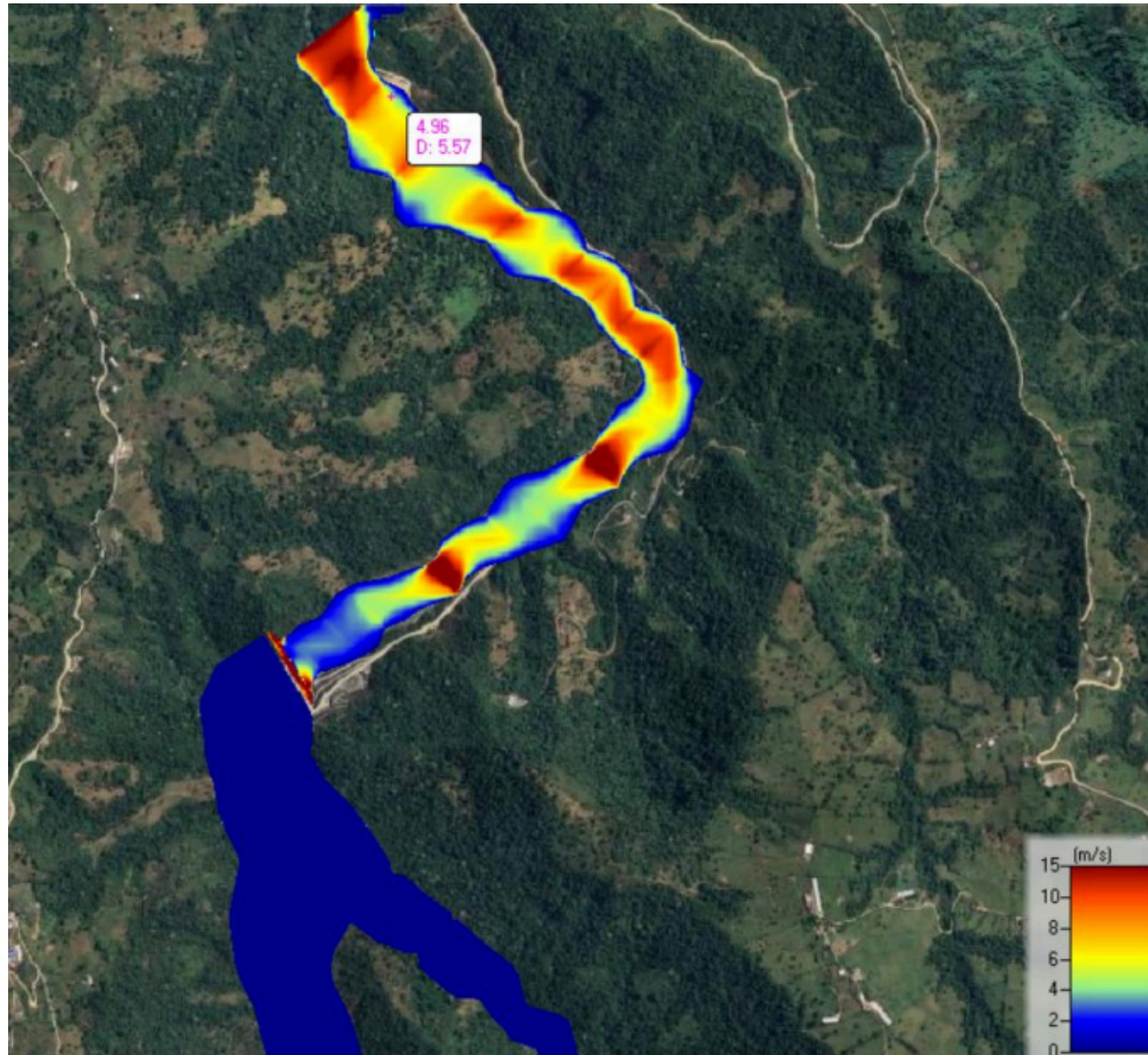
Se infiere que las profundidades máximas de inundación alcanzan valores aproximados entre 15 m y 5 m durante el pico del evento.

### Extensión del área afectada

El tramo analizado presenta una longitud de 3 km y un ancho promedio de 220 m, teniendo en cuenta la expansión del flujo hacia las márgenes del valle.

Con estos valores, se obtuvo un área total de afectación cercana a 660 000 m<sup>2</sup>, lo que equivale a 66,0 hectáreas.





### Representación de velocidad y profundidad del flujo

En el punto de control ubicado en la hormigonera perteneciente al cuerpo de Ingenieros del Ejército

Los resultados ante el escenario de rotura, la inundación alcanza una profundidad máxima de 5,57 m y una velocidad de 4,96 m/s.



### Acción de prevención y mitigación de riesgos

Teniendo en cuenta que el escenario de rotura proporciona caudales superiores a los 54.000 m<sup>3</sup>/s, velocidades de 8,5 m/s y tiempos de llegada de la onda de inundación inferiores a los 15 minutos a una distancia de 3 km aguas abajo

1

Sensores de nivel de agua en el embalse, detecta incrementos anormales

2

Piezómetros para el control de presiones en el cuerpo y la cimentación de la presa

3

Inclinómetros y fisurómetros para el monitoreo de deformaciones estructurales.

4

Sirenas de alta potencia, ubicadas estratégicamente en las zonas pobladas, aguas abajo

5

Señalización acústica y visual que indique claramente la necesidad de evacuar de inmediato.

### Acción de prevención y mitigación de riesgos



1

#### **Enrocado de protección y espolones**

Para la protección de taludes críticos aguas abajo



2

#### **Dientes o dados disipadores**

Transforman el flujo supercrítico en subcrítico mediante el salto hidráulico



3

#### **Canal de descarga revestido**

Reduce expansión lateral y protege infraestructura cercana



# CONCLUSIONES

1.-Una vez caracterizada la cuenca del río Toachi Área = 1.476 km<sup>2</sup>, se determinó el caudal de diseño para un período de retorno de 100 años ,mediante modelación en HEC-HMS se obtuvo un caudal pico de 742,4 m<sup>3</sup>/s, adoptado como caudal máximo de diseño, Este valor fue utilizado en HEC-RAS para simular el escenario de rotura de presa y evaluar el comportamiento hidráulico ante eventos extremos, garantizando criterios de seguridad para la infraestructura.

2.-El análisis de estabilidad al deslizamiento, conforme a criterios del USACE, demuestra que la presa cumple los requisitos de seguridad, se obtuvo un FS = 3,36 en condición normal y FS = 1,74 en condición extrema, valores superiores a los mínimos exigidos, los esfuerzos máximos y mínimos se mantienen dentro de límites admisibles .El análisis pseudoestático sísmico confirma que no se compromete la estabilidad global. Sin embargo, el estudio se realizó bajo un enfoque elástico lineal, sin modelación dinámica o no lineal más avanzada.

3.-La modelación de rotura con HEC-RAS evidenció un escenario de alto riesgo hidráulico.

Se obtuvo un caudal máximo de 54.500 m<sup>3</sup>/s, velocidades mayores a 8,6 m/s y una brecha final de 55 m.

Los resultados confirman la generación de una onda de avenida catastrófica, con rápida liberación del volumen almacenado y alta capacidad de daño aguas abajo.

1. Complementar el estudio con un análisis dinámico más detallado (modal espectral o tiempo–historia) para representar con mayor precisión la respuesta sísmica de la presa. Por ende, se sugiere desarrollar una modelación no lineal mediante elementos finitos (FEM), considerando la fisuración del concreto, la pérdida de contacto en la base y la interacción presa–agua–fundación.
2. Se recomienda calibrar y validar el modelo con eventos históricos del Río Toachi, empleando datos hidrométricos, marcas de inundación y series pluviométricas confiables, ajustando parámetros como Manning y lluvia–escorrentía. Además, es necesario actualizar periódicamente los insumos mediante MDE de mayor resolución (LIDAR), depuración de registros y evaluación de escenarios de cambio climático, fortaleciendo el modelamiento de la rotura de la Presa Toachi para la planificación y gestión del riesgo.
3. Se recomienda fortalecer la normativa nacional alineándola con estándares internacionales más exigentes, como los aplicados por la Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico de Brasil y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España. La incorporación de análisis probabilísticos y clasificaciones de riesgo más estrictas permitiría elevar los estándares de seguridad hidráulica y gestión del riesgo en el país.



**¡ MUCHAS  
GRACIAS !**

