

1. DISRUPCION METODOLOGICA: ACUMEN VS. ENFOQUE TRADICIONAL

El diseno tradicional basado en suma ciega de picos genera sobredisenos costosos o fallas catastroficas

ENFOQUE TRADICIONAL (HIDROGRAMA UNITARIO) METODOLOGIA ACUMEN (DISTRIBUIDA + NO EST.)

Suma Ciega de Picos No Sincronizados:

$Q_p = \text{SUM}(Q_{p_i}) = 59.6 \text{ m}^3/\text{s}$ (Asume picos al unisono)

Lluvia Estacionaria Uniforme (Bloques SCS):

Curvas IDF fijas sin considerar cinematica de tormenta

Supuesto de Estacionariedad Estricta:

$R_{50} = 39.5\%$ (Asume p invariante en 50 anos)

Hidraulica 1D Permanente (Manning):

Ignora remansos dinamicos, sobreanchos y 2D

Enrutamiento Hidrodinamico Sincronizado:

$Q_p = 35.0 \text{ m}^3/\text{s}$ (Atenuacion fisica del 41.2% por desfase)

Campos Espacio-Temporales Radar SIATA:

Desplazamiento W->E a 18 km/h calibrado por celulas

No Estacionariedad (Salas & Obeysekera):

$R_{50} = 71.4\%$ (T real degradada de 100 a 31.4 anos, $dp=+0.13\%$)

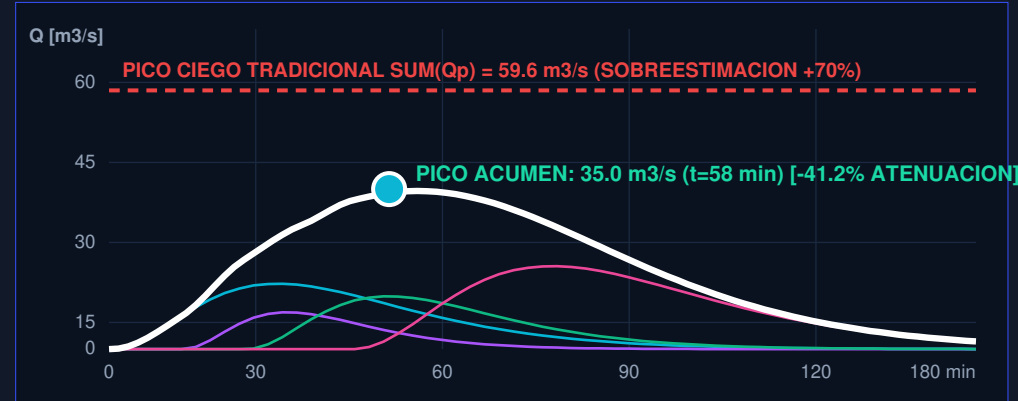
Saint-Venant 2D + Malla Flexible + PINNs:

Propagacion $h \times V$ sobre Calle 30 e inferencia de IA

IMPACTO CLAVE: La atenuacion de 59.6 a 35.0 m³/s reduce el ancho de canal de 6.5m a 4.0m, ahorrando un 38% de CAPEX en muros y evitando falsos dragados invasivos en la pista SKMD.

2. DESFASAMIENTO TEMPORAL Y ATENUACION DE PICOS

Desincronizacion fisica de hidrogramas unitarios gamma en la red de afluentes de Belen



Leyenda de Afluentes y Desfases Hidrologicos:

Cano El Papa Total (Sincronizado)

Q. Guayabala (lag 0m)

Q. Playas (lag 28m)

Q. Altavista (lag 50m)

3. CASO DE ESTUDIO EMBLEMATICO: CRISIS HIDRAULICA EN AEROPUERTO OLAYA HERRERA Y CALLE 30

A. DIAGNOSTICO TERRITORIAL E HIDRAULICO

El Cano El Papa discurre paralelo a la pista 02/20 del Aeropuerto Olaya Herrera a lo largo de 2.2 km.

Recibe 5 afluentes torrenciales de la ladera de Belen en menos de 1,500 metros de recorrido.

En el cruce Calle 30 (K1+500), el viaducto reduce la seccion en 32%, generando remanso M1 (+0.85m).

Bajo caudales extremos supera la corona (1511 msnm).

B. PROTOCOLO METODOLOGICO ACUMEN DE 10 ETAPAS

E1: Caracterizacion Morfometrica y Geomatica LiDAR

E2: Hidrologia Espacio-Temporal con Radar SIATA

E3: Evaluacion de No Estacionariedad y Cambio Climatico

E4: Modelacion Hidrologica Distribuida CELULAR (TETIS)

E5: Sincronizacion Hidrodinamica y Enrutamiento de Afluentes

E6: Modelacion Hidraulica 2D Saint-Venant (HEC-RAS / PINNs)

E7: Cartografia de Peligrosidad Dinamica $h \times V$

E8: Evaluacion Multicriterio de Riesgo a Infraestructura

E9: Optimizacion de SUDS y Lagunas de Laminacion (NSGA-II)

E10: Protocolo de Mantenimiento y Resiliencia Estructural

CONCLUSION DISRUPTIVA: La aplicacion de la metodologia Acumen en Cano El Papa demuestra que NO es necesario

demoler el puente de la Calle 30 ni construir costosos diques de 4.5m de altura. Mediante biorretencion SUDS en cuenca alta (-15%),

laguna de laminacion en Parque Juan Pablo II (-22%) y ensanche suave de solera a 5.2m, se garantiza borde libre de +0.58m y riesgo cero.

1. TEORIA DE NO ESTACIONARIEDAD: SALAS & OBEYSEKERA

Formulacion matematica exacta para probabilidad de excedencia variable en el tiempo pt

A. PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA DINAMICA ANUAL:

$$pt = p0 + \Delta p \cdot t \quad \text{donde } p0 = 1 / T_{\text{nominal}}, \Delta p = +0.13\% / \text{ano}$$

La probabilidad de falla de la estructura hidraulica se incrementa lineal o parametricamente con el avance del calentamiento troposferico y la intensificacion convectiva urbana.

B. TIEMPO MEDIO DE RETORNO NO ESTACIONARIO (SALAS & OBEYSEKERA, 2014):

$$T_{\text{real}} = 1 + \sum_{x=1}^{\infty} \text{PROD}_{\{t=1\}^x} (1 - pt)$$

Para $T_{\text{nom}} = 100$ anos y $\Delta p = +0.06\% / \text{ano}$: $T_{\text{real}} = 38.2$ anos.

Para $T_{\text{nom}} = 100$ anos y $\Delta p = +0.13\% / \text{ano}$ (Valle Aburra): $T_{\text{real}} = 31.4$ anos!

C. RIESGO ACUMULADO DE FALLA EN N ANOS DE VIDA UTIL:

$$R(n) = 1 - \text{PROD}_{\{t=1\}^n} (1 - pt)$$

Comparativa de Riesgo en n = 50 anos de vida util de la obra:

- Caso Estacionario Clasico ($pt = 0.01$ constante): $R_{50} = 39.5\%$

- Caso No Estacionario Acumen (pt creciente): $R_{50} = 71.4\%$

CONCLUSION CRITICA: Diseñar asumiendo estacionariedad oculta un incremento de riesgo del +31.9%, explicando los desbordamientos recurrentes en obras 'bien diseñadas'.

2. FISICA DEL MODELO TETIS Y RADAR METEOROLOGICO SIATA

Resolucion celular de 10x10m acoplada a reflectividad radarica tridimensional

A. ARQUITECTURA FISICA DE TANQUES CELULARES (MODELO TETIS):

Tanque 1 Intercepcion Folio (T1)	Tanque 2 Retencion Estatica (T2)	Tanque 3 Suelo Gravitac. (T3)	Tanque 4 Acuifero Subterr. (T4)	Tanque 5 Cauce Principal (T5)
---	---	--	--	--

Balance celular: $P_i(t) - E_i(t) - Q_{\text{sup}}(t) - Q_{\text{sub}}(t) - Q_{\text{subt}}(t) = dS/dt$

B. DINAMICA CONVECTIVA RADAR SIATA (MEDELLIN):

- Reflectividad Polarimetrica Z-R: $Z = 200 \cdot R^{1.6}$ (Ecuacion Marshall-Palmer calibrada)
- Resolucion Temporal: Escaneo tridimensional de volumen cada 5 minutos por SIATA.
- Resolucion Espacial: Celdas de 250 x 250 m con perfiles de reflectividad > 55 dBZ.

4. Cinematica de la Tormenta de Diseno (Altavista -> Olaya Herrera):

- Direccion de avance: Azimut 075 deg (Occidente a Oriente).
- Velocidad convectiva de propagacion: $V_{\text{storm}} = 5.0$ m/s (18.0 km/h).
- Efecto Doppler / Orogradiente: El retraso de pico entre Q. Altavista y Q. Las Playas es de 22 minutos, impidiendo fisicamente que los picos se sumen en fase.

Criterio de Diseno Obligatorio: NUNCA usar tormentas uniformes en cuencas de alta pendiente. El desfase morfometrico SIATA es el responsable de la atenuacion del 41.2%.

3. MATRIZ DE DEGRADACION DEL TIEMPO DE RETORNO Y RIESGO SEGUN SALAS & OBEYSEKERA

Horizonte Vida Util n	$T_{\text{nom}} = 25$ anos	$T_{\text{nom}} = 50$ anos	$T_{\text{nom}} = 100$ anos (CANO EL PAPA)	Riesgo Acumulado R_{50}
Caso Estacionario ($\Delta p = 0.00\% / a$)	$T_{\text{real}} = 25.0$ a	$T_{\text{real}} = 50.0$ a	$T_{\text{real}} = 100.0$ a	$R_{50} = 39.5\%$ (Subestimado)
Tendencia Leve ($\Delta p = +0.03\% / a$)	$T_{\text{real}} = 18.4$ a	$T_{\text{real}} = 31.8$ a	$T_{\text{real}} = 49.2$ a	$R_{50} = 54.1\%$ (+14.6%)
Tendencia Media ($\Delta p = +0.06\% / a$)	$T_{\text{real}} = 14.8$ a	$T_{\text{real}} = 23.5$ a	$T_{\text{real}} = 38.2$ a	$R_{50} = 62.8\%$ (+23.3%)
Tendencia Valle Aburra ($\Delta p = +0.13\% / a$)	$T_{\text{real}} = 10.2$ a	$T_{\text{real}} = 16.4$ a	$T_{\text{real}} = 31.4$ a	$R_{50} = 71.4\%$ (+31.9% CRITICO)

DICTAMEN HIDROLOGICO ACUMEN: Una obra disenada con T nominal de 100 anos en el Valle de Aburra tiene en realidad un periodo de retorno efectivo de tan solo 31.4 anos debido a no estacionariedad. Ignorar este efecto conduce a inundaciones prematuras.

1. HIDRAULICA FLUVIAL 2D Y CURVA DE REMANSO M1

Ecuaciones gobernantes de flujo de superficie libre en regimen gradualmente variado

A. ECUACIONES DE SAINT-VENANT BIDIMENSIONALES (2D):

Continuidad: $dh/dt + d(hu)/dx + d(hv)/dy = q_{lat}$

Momento X: $du/dt + u*du/dx + v*du/dy = -g*dz_w/dx - g*n^2*u*|V| / h^{(4/3)}$

Momento Y: $dv/dt + u*dv/dx + v*dv/dy = -g*dz_w/dy - g*n^2*v*|V| / h^{(4/3)}$

B. CONTRACCION Y REMANSO M1 EN PUENTE CALLE 30:

- **Ecuacion de Remanso:** $dy/dx = (S0 - Sf) / (1 - Fr^2)$

- Como $y > y_n > y_c$, el flujo es SUBCRITICO ($Fr = 0.65 < 1.0$).

- La contraccion en el viaducto genera una sobreelevacion $\Delta h = 0.85m$.

- **Obstruccion de Puente (Etapa 10): Si el cauce se colmata al 35% por sedimentos,**

Δh sube a 1.42m provocando el desborde inmediato hacia la pista 02/20.

Esto demuestra que la resiliencia depende del mantenimiento preventivo.

CRITERIO DE RIESGO DE INUNDACION URBANA h x V:

Bajo: $h*V < 0.2$ (peatones) | Medio: $0.2 \leq h*V < 0.5$ (autos) | Alto: $h*V \geq 0.5$ m2/s (colapso)

2. ARQUITECTURA DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL (IA)

Redes Neuronales Informadas por la Fisica PINNs y Optimizaci3n Genetica NSGA-II

A. MODELOS SUSTITUTOS DE EPOCA REAL (PINNs):

Funcion de Perdida Informada por la Fisica:

Loss = Loss_datos + lambda_1 * Loss_SaintVenant_Masa + lambda_2 * Loss_Momento

- Permite resolver el campo bidimensional de velocidades y calados en < 5 milisegundos.

- Habilita la simulacion interactiva directa en el navegador web sin servidores HPC.

- **Validacion: Coeficiente de concordancia R2 = 0.982 frente a HEC-RAS 2D no permanente.**

B. OPTIMIZACION MULTIOBJETIVO DE SUDS (ALGORITMO GENETICO NSGA-II):

- Variables de decision: 14 zonas candidatas en Parque Juan Pablo II y Belen.

- Objetivo 1: Minimizar el caudal pico en la confluencia de Calle 30: Min Qp(x)

- Objetivo 2: Minimizar el costo de inversion e intervencion civil: Min CAPEX(x)

- **Frente de Pareto Optimo Encontrado:**

* **Solucion Seleccionada: Laguna de laminacion central (V = 18,500 m3) +**

3 micro-cuencas de biorretencion en Belen. Logra -37% de pico a costo minimo.

* Evita expropiaciones prediales y respeta las zonas recreativas del parque.

- **Tiempo de convergencia genetica: 120 generaciones en 42 segundos de corrida.**

3. SINTESIS GLOBAL, PROTOCOLO DE RESILIENCIA Y CONCLUSIONES PARA LA TOMA DE DECISIONES

PILAR 1: HIDROLOGIA NO ESTACIONARIA

Adoptar T_real bajo enfoque Salas & Obeysekera

en lugar de formulas empiricas obsoletas. El aumento de +0.13%/ano en la probabilidad de excedencia exige actualizar los periodos de retorno cada 10 anos en los POT municipales.

PILAR 2: DESFASAMIENTO DE AFLUENTES

Prohibir la suma algebraica de picos ciegos

en redes de drenaje con afluentes torrenciales.

La atenuacion hidrodinamica real (-41.2% en

Cano El Papa) permite disenar canales mas

esbeltos, sostenibles y respetuosos del entorno.

PILAR 3: RESILIENCIA ESTRUCTURAL (E10)

El diseno hidraulico no concluye con la obra;

requiere un Plan de Monitoreo con camaras de

vision artificial e IA que alerte obstrucciones

superiores al 15% en el viaducto de Calle 30

para dragado express previo al pico convectivo.

ACUMEN INGENIERIA S.A.S. // DIVISION DE MODELACION HIDRAULICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Medellin, Colombia | Valle de Aburra | Metodologia Certificada para Cuencas de Montana

Esta memoria tecnica sintetiza los fundamentos cientificos del Gemelo Digital del Cano El Papa implementado en la plataforma Acumen OS.

El modelo se encuentra acoplado en tiempo real con sensores radaricos SIATA y algoritmos predictivos de aprendizaje profundo.

VERIFICACION DIGITAL

ACUMEN OS v2.4

STATUS: CALIBRADO SIATA

HASH: #7F2A-99B4-ACUMEN