



## Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

# EVALUACIÓN DE MAREA DE TORMENTA O SURGENCIA.

### GENERACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN, PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, EN LA REGIÓN HIDROGRÁFICA MANDINGA-COMALAPA.

Por José Rodolfo Valles y Joaquín Serrano Choto, de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador (UES) y Haydee Beltrán; Adriana Erazo; Roberto Cerón y Edwin Escobar, técnicos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

#### RESUMEN

Este trabajo presenta el cálculo de la altura de marea o surgencia (marea meteorológica+ marea astronómica + Run-up) y su efecto en las condiciones de frontera que deben establecerse, para la evaluación en el modelaje de las inundaciones provocadas por ríos en la zona costera.

Para el cálculo de la marea meteorológica, el primer paso fue determinar la velocidad máxima y la presión mínima histórica de un ciclón tropical en el Pacífico Este, en base a registros históricos brindados por el Departamento Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés), posteriormente se determinó la marea astronómica en base a una serie de 19 años de registro para los distintos puertos en el país (La Unión, La Libertad y Acajutla) y finalmente se calculó el Run-up para condiciones extremas de oleaje y playa disipativa. Los resultados muestran una surgencia de 3.24 metros para El Puerto de La Libertad, 3.10 metros para El Puerto de Acajutla y 4.00 metros para El Puerto de La Unión.

Palabras claves: Surgencia, Marea Astronómica, Marea Meteorológica y Run-up.

#### ABSTRACT

This paper presents the calculation of wave height or upwelling (meteorological tide astronomical tide + Run-up) and their effect on the boundary conditions in the assessment of flooding from rivers in the coastal zone. To calculate the meteorological tide, the first step is to determine the maximum and minimum pressure history of a tropical cyclone in the Eastern Pacific, based on historical records provided by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), then the astronomical tide was determined based on a series of 19 years of records for various ports in the country (La Union, La Libertad and Acajutla) and finally calculated the run-up to extreme waves and dissipative beach. The results show an upwelling of 3.24 meters to the port of La Libertad, 3.10 meters for the Port of Acajutla and 4.00 meters for the Port of La Union.

Keywords: Upwelling, Meteorological tide, Astronomical Tide and Run-Up.

## Introducción

Para evaluar los alcances de una inundación provocada por la descarga de un río en la zona cercana a la desembocadura, es necesario evaluar una marea de tormenta, para conocer como se interrelaciona con la descarga de un río o quebrada y los efectos que esta relación provoca.

Los eventos hidrometeorológicos no solo pueden dejar grandes cantidades de lluvia, sino que también aumentan la marea, ya que los vientos en altura empujan la superficie oceánica, haciendo que el agua se eleve por encima del nivel normal del mar, y la baja presión en el centro del sistema atmosférico provoca una onda de presión que eleva el nivel del mar.

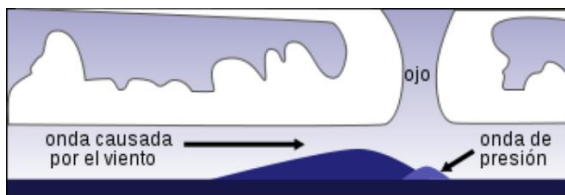


Figura 1: Ilustración gráfica de marea ciclónica

Este fenómeno se agrava cuando coincide con la pleamar y con el ascenso de la masa de agua ocasionado al romper el oleaje en la playa o sobre una estructura conocido como Run-Up.

La inundación causada por el desbordamiento de un río puede ser agravada por una surgencia o marea de tormenta, permitiendo tener el escenario más desfavorable probable, y para el cual se hicieron modelaciones considerando periodos de retorno (2, 5, 10, 25, 50 y 100 años).

## Cota de inundación por marea de tormenta.

La cota de inundación se define como la suma de la marea meteorológica, astronómica y el Run-up (Figura 2). Donde la marea meteorológica esta influenciada por una sobreelevación por viento y presión de un ciclón Tropical. la marea astronómica es el periodo de ascenso y descenso de la superficie de los grandes cuerpos de agua producida por la Luna y en menor influencia el sol y el Run-up, que es la elevación vertical de la superficie de agua máxima con respecto al nivel del mar.

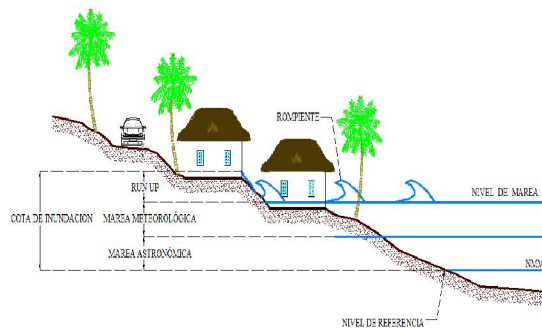


Figura 2: Cota de inundación provocada por una marea de tormenta o surgencia.

$$CI = MA + MM + R$$
$$MM = S_v + S_p$$

Donde:

CI = cota de inundación

MA = marea astronómica

MM = marea meteorológica

R<sub>u</sub> = Run-Up

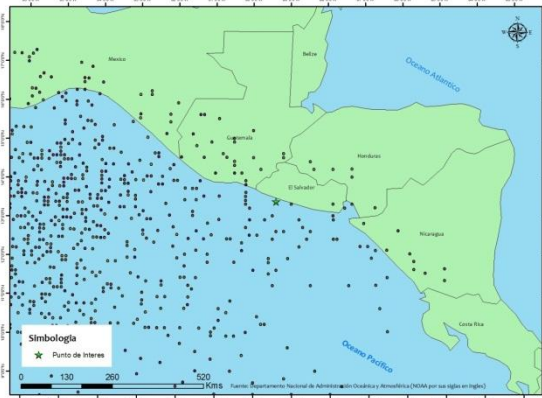
S<sub>p</sub> = sobreelevación por presión atmosférica

S<sub>v</sub> = sobreelevación por viento

## Cálculo de la marea meteorológica

Se determinó un radio de 500 km de las costas salvadoreñas (distancia necesaria para que un fenómeno de máxima intensidad provoque efectos en un punto determinado), e interceptamos los ciclones tropicales con

diferentes radios de afectación: 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 y 60 Km (Figuras 5 y 6) de manera de poder determinar los ciclones que provocan un aumento del nivel de la marea, en las costas salvadoreñas.



**Figura 3: Ciclones tropicales en el Océano Pacífico Este. Periodo 1866-2011. Fuente: Elaboración propia con datos de la NOAA**

Una vez determinado los ciclones que pudieron tener influencia en la marea, se redujeron los datos de 1866-2011 a datos de 1930-2011, debido a que antes de 1930 los métodos de observación fueron distintos a los usados actualmente.

De dichos datos, se observó que no se tienen registros de huracanes categoría II, III, IV y V; solamente un registro de Huracán categoría I en el año 2005 denominado “Adrián” con velocidades que rondaron los 36 m/s y una presión de 982 mb; además de 35 Depresiones Tropicales.

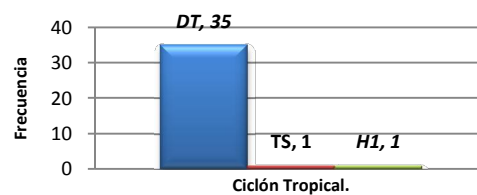
| CATEGORIA | DT     | TS     | H1     |
|-----------|--------|--------|--------|
| V (kt)    | 30     | 60     | 70     |
| V (m/s)   | 15.433 | 30.867 | 36.011 |

**Tabla 1: Velocidades máximas históricas para distintos ciclones tropicales.**

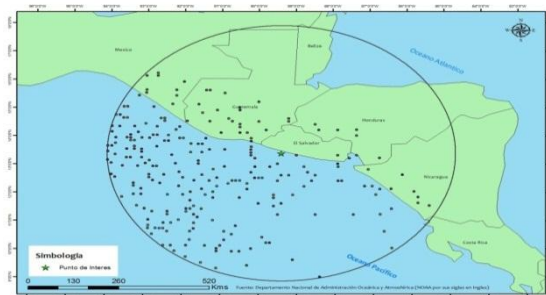
Para el análisis se obtiene el escenario más desfavorable: el de un Ciclón Tropical de características como Depresión Tropical (DT),

Tormenta Tropical (TS) o un Huracán Categoría I (H1) que se forme en el radio mínimo posible para ser sentido enfrente de nuestras costas, lo cual, provocaría un aumento significativo en la marea de tormenta o surgencia.

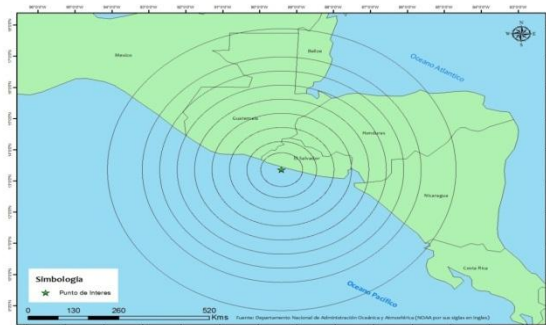
Con lo anterior, tomamos el menor valor de presión y el máximo valor de velocidad registrada por todas las Depresiones Tropicales, Tormentas Tropicales y Huracán Categoría I, dentro de los 500 Km.



**Figura 4: Ciclones tropicales en radio de 500 km de las costas salvadoreñas**



**Figura 5: Ciclones tropicales máximo posible de afectación**



**Figura 6: Radios de afectación**

Del radio de afectación se obtuvo la velocidad máxima y la presión mínima para distintos ciclones tropicales (DT, TS y H1).

| CATEGORIA | DT      | TS     | H1     |
|-----------|---------|--------|--------|
| Po (mb)   | 1004.00 | 986.00 | 982.00 |

**Tabla 2: Presiones mínimas históricas para distintos ciclones tropicales.**

La sobrelevación por viento, se calcula con la ecuación de Keugelan, para distintas profundidades en la costa (50, 10, 5, 3 y 0 metros).

Los resultados se muestran en la tabla 3

$$S = \frac{kV^2 x}{g(H - H - S)} \ln \frac{H}{H + S}$$

Donde:

$S_v$  = sobrelevación por viento (m)

$K$  = constante de esfuerzo del viento ( $3 \times 10^{-6}$ )

$V_v$  = velocidad máxima del viento sostenida (m/s)

$x$  = distancia desde el borde continental hasta la costa,

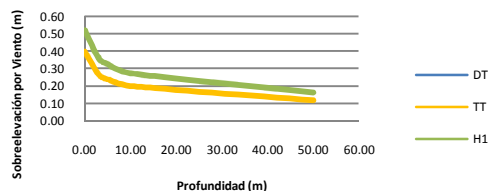
$g$  = aceleración por la gravedad ( $m^2/seg$ ),

$H_1$  = profundidad en el borde de la plataforma (200m)

$H$  = profundidad en la costa.

| CATEGORIA | H (m) | $S_v$ (m) |
|-----------|-------|-----------|
| DT        | 50    | 0.03      |
|           | 10    | 0.05      |
|           | 5     | 0.06      |
|           | 3     | 0.07      |
|           | 0     | 0.12      |
| TS        | 50    | 0.12      |
|           | 10    | 0.20      |
|           | 5     | 0.24      |
|           | 3     | 0.27      |
|           | 0     | 0.40      |
| H1        | 50    | 0.16      |
|           | 10    | 0.27      |
|           | 5     | 0.32      |
|           | 3     | 0.36      |
|           | 0     | 0.52      |

**Tabla 3: Sobrelevación por viento para distintos ciclones tropicales**



**Figura 7: Sobrelevación por viento para distintas profundidades**

La sobrelevación por presión se determina encontrando el radio del máximo viento ciclostrofico "R" de la siguiente ecuación:

$$R = 0.4785P - 413.01$$

Donde:

$R$  = máximo viento ciclostrofico en Km

$P_o$  = presión mínima en mb.

Una vez determinado el valor de "R", se determina la sobrelevación por presión de la siguiente ecuación:

$$S = 0.01018(P - P) 1 - e$$

Donde:

$S_p$  = sobrelevación por presión (m)

$P_n$  = presión normal (1013 mb)

$r$  = distancia radial desde el centro de la tormenta al punto de cálculo sobre una línea transversal (Km)

| CATEGORIA | $S_p$ (m) |
|-----------|-----------|
| DT        | 0.06      |
| TS        | 0.17      |
| H1        | 0.20      |

**Tabla 4: Sobrelevación por presión para distintos ciclones tropicales.**

Una vez determinado la sobrelevación por viento y presión, obtenemos la marea meteorológica.

| CATEGORIA | $S_v$ | $S_p$ | MM   |
|-----------|-------|-------|------|
| DT        | 0.12  | 0.06  | 0.18 |
| TS        | 0.40  | 0.17  | 0.57 |
| H1        | 0.52  | 0.20  | 0.72 |

**Tabla 5: Marea meteorológica para distintos ciclones tropicales.**

### Cálculo de la marea astronómica

El cálculo de la marea astronómica se hizo en base a los registros históricos de 19 años del programa XTIDE. En donde los máximos históricos anuales son los mostrados en la tabla 6.

| PUERTO              | ALTURA DE MAREA EN METROS |             |          |
|---------------------|---------------------------|-------------|----------|
|                     | LA UNION                  | LA LIBERTAD | ACAJUTLA |
| Alta                | 4.00                      | 2.70        | 2.60     |
| Baja                | -0.90                     | -0.60       | -0.60    |
| Nivel Medio del Mar | 1.51                      | 1.01        | 0.97     |

*Tabla 6: Promedios Históricos de 19 años de registros en los distintos puertos en El Salvador.*

## Cálculo del Run-up

Para el cálculo del Run-Up se utilizaron las siguientes ecuaciones en donde se tendrían condiciones extremas de oleaje y la playa sería disipativa.

$$L = \frac{gT}{2\pi}$$

$$R = 0.05 \sqrt{H L}$$

Donde:

Lo = longitud de onda en aguas profundas (m)

T = periodo de la ola

g = aceleración de la gravedad (m<sup>2</sup>/seg)

R<sub>rms</sub> = Run-Up (m)

H<sub>rms</sub> = es la altura de la ola cuadrática (2.5 metros)

Ingresando todos los resultados, se obtiene un Run-Up de 0.79 metros.

La marea de tormenta o surgencia se muestra en la tabla 7:

| PUERTO REFERENCIA | MA   | MM   | RUN-UP | SURGENCIA |
|-------------------|------|------|--------|-----------|
| La Libertad       | 1.73 | 0.72 | 0.79   | 3.24      |
| Acajutla          | 1.59 | 0.72 | 0.79   | 3.10      |
| La Unión          | 2.49 | 0.72 | 0.79   | 4.00      |

*Tabla 7: Marea de tormenta en las costas salvadoreñas*

## Conclusiones

La sobrelevación por viento de la marea meteorológica genera datos inversamente proporcionales a distintas profundidades en la costa y esta influenciado por la máxima velocidad registrada por un ciclón tropical en

un radio de 500 km alrededor de nuestras costas.

Las cotas de inundación desarrolladas en este documento, pueden ser utilizadas como aproximación valedera en toda la zona costera del país, para los análisis de las crecidas y los efectos de las mismas.

## Agradecimientos

Este trabajo presenta parte de los resultados obtenidos en la tesis “Generación de mapas de inundación, para diferentes periodos de retorno, en la región hidrográfica Mandinga-Comalapa”. Realizado con el apoyo técnico y económico del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

## Referencias

“Riesgo de inundación por marea de tormenta en el municipio de CD. Madero, Tamaulipas”. Ricardo Manuel García Balan. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario Tampico – Madero, Abril del 2008.

Procesos Litorales, Volumen II, Universidad de Cantabria.