

Determinar si la norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, cumple el objetivo al definir la zona de protección litoral.

Proyecto para optar al título de
Ingeniero Civil Oceánico

Autor: Sebastián Correa Araya.
Profesor Guía: Mario Herrera Araya.
Comisión Evaluadora: Matías Quezada Labra.
Cristian Flores Pérez.

Contenido

- Resumen.
- Introducción.
- Metodología.
- Análisis de resultados.
- Conclusión.

El estudio consistió en **determinar si se cumple el objetivo** establecido en la Norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales, al obtener el ancho de la Zona de Protección Litoral (ZPL).

- Buscó una **posible relación** entre el ancho de la Zona de Protección Litoral y el Ancho de la Zona de Rotura.
- Determinó la **diferencia porcentual** entre los anchos de la ZPL calculados **con o sin** la inclusión del coeficiente P para 23 nodos ubicados a lo largo de Chile.
- Determinó la diferencia entre **métodos de interpolación**, al obtener el valor no tabulado del coeficiente P.
- Realizaron **modelaciones numéricas** con Surface-water Modeling System (SMS) para determinar si las partículas descargadas en un punto próximo al límite exterior de la **ZPL ingresan a esta** y bajo qué circunstancias.

Aspectos Normativos

D.S N°90/2000 (MINSEGPRES)

Define la ZPL , la formula para calcular el ancho de la ZPL e indica limites máximos de concentración de contaminantes dentro y fuera de la ZPL.

Ancho de la Zona de Protección Litoral

$$A = \left[\frac{1,28 * Hb}{m} \right] * 1,6$$

Donde,

Hb = Altura media de la ola rompiente [m].

m = Pendiente del fondo.

A = Ancho de Zona de Protección de Litoral [m].


Aspectos Normativos

Circular Marítima A-53/004 DGTM y MM

Para las zonas expuestas al oleaje oceánico la circular recomienda la formula de Rattanapitikon & Shibayama (2000) para calcular la **Altura de la ola rompiente**, es decir:

$$H_b = (10,02m^3 - 7,46m^2 + 1,32m + 0,55)H_o \left[\frac{H_o}{L_o} \right]^{-1/5}$$

Donde,
Ho=Altura de ola en aguas profundas[m].
Lo=Longitud de ola en aguas profundas[m].
m =pendiente del fondo.


$$P = H_o \left[\frac{H_o}{L_o} \right]^{-1/5}$$

Aspectos Normativos

Coeficiente P

$$H_b = (10,02m^3 - 7,46m^2 + 1,32m + 0,55) * P$$

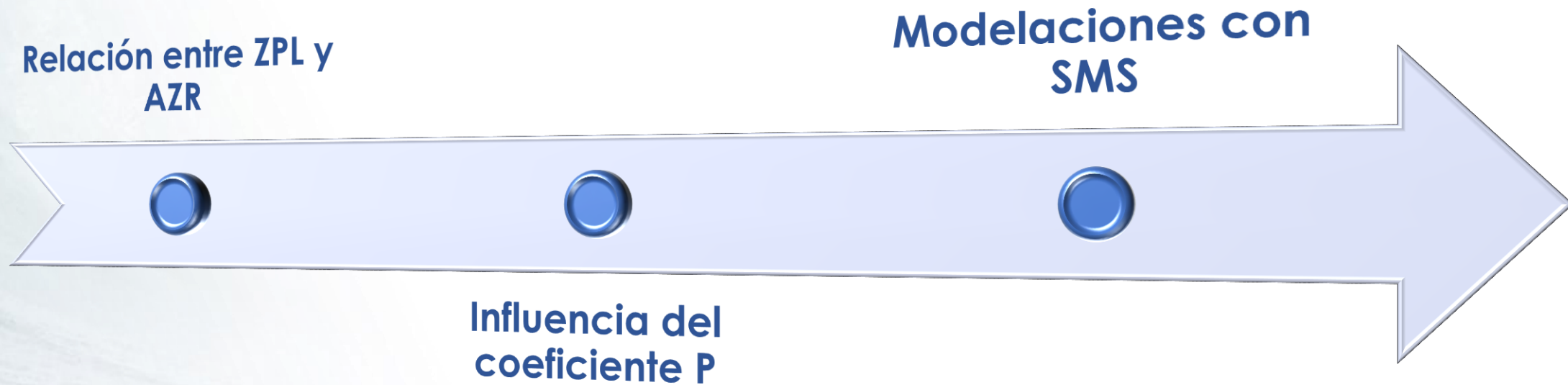
(Circular A-53/004, 2012)

Tabla del Coeficiente P tabulado

Latitud	P
18°S	7,54
20°S	7,79
24°S	7,95
27°S	8,27
30°S	9,07
33°S	9,57
35°S	10,50
37°S	10,74
42°S	12,06
53°S	14,61

(Fuente: Circular A-53/004, 2012)

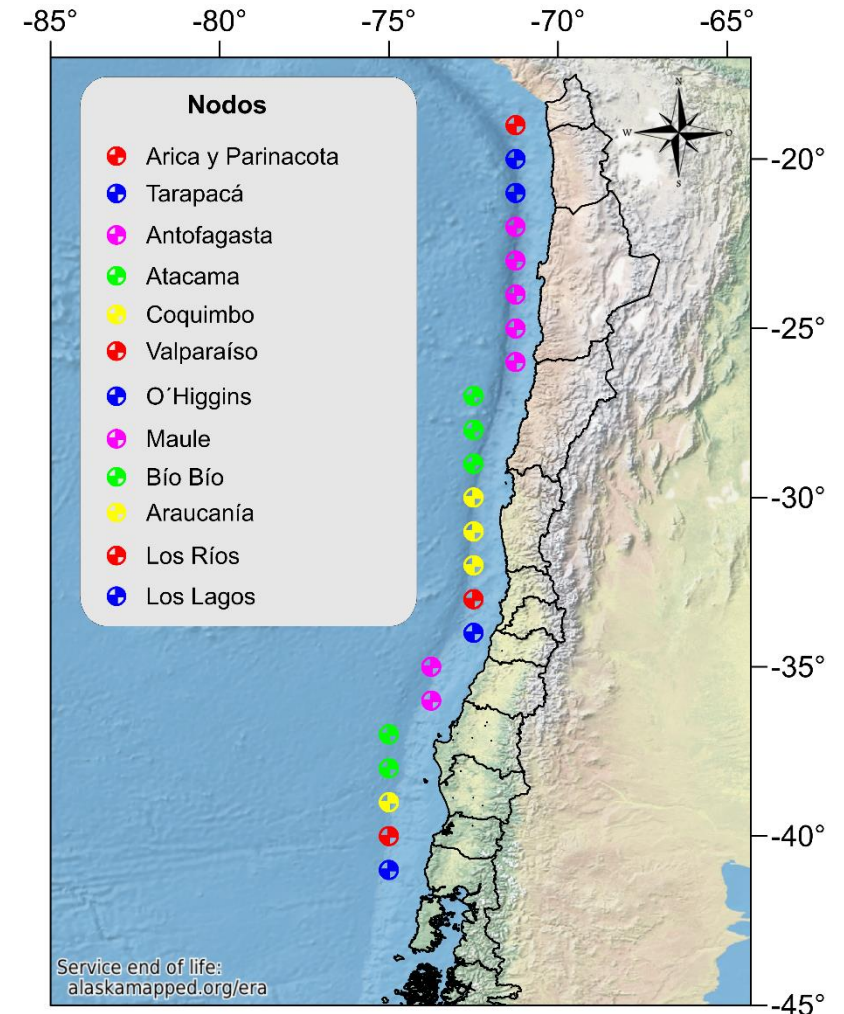
Esquema metodológico



Base de datos oleaje

- Se ubicaron 23 nodos a la cuadra a lo largo de Chile.
- Extracción de datos: Altura Significativa, periodo peak y dirección.
- Tiempo de Reanálisis:
 - ERA-Interim 36 años cada 6 Hrs. desde 1979 al 2015.
 - WaveWatch III 14 años cada 3 Hrs. desde 1997 al 2010.

Ubicación de nodos



(Fuente: Elaboración propia)

Pendiente de fondo

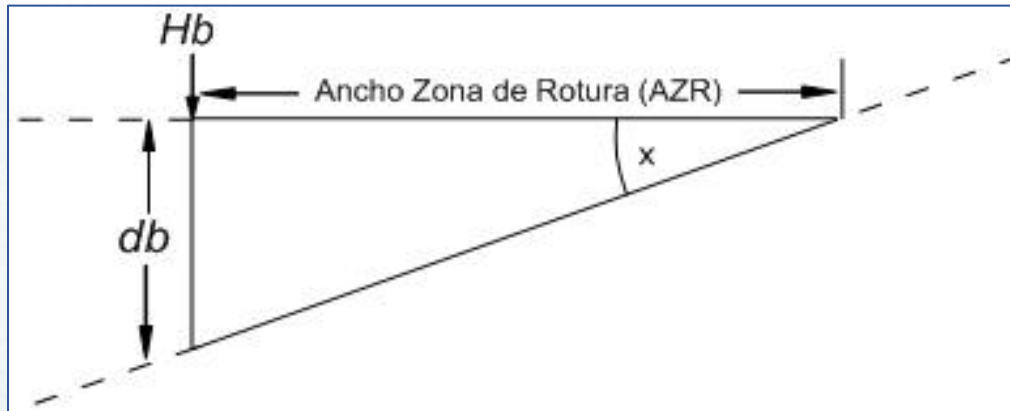
- Suave ($m=0,07$)
- Intermedia ($m=0,1$)
- Elevada ($m=0,44$)

Tabla coeficiente de correlación valor Run-Up
CMS-Wave vs Experimentos

Pendiente	Promedio Calculado R2 (m)	Promedio Medido R2	Diferencia Promedio	Coeficiente de correlación
1:1	0,40	0,29	0,11	0,74
2:3	0,41	0,39	0,02	0,86
1:2	0,44	0,43	0,01	0,90
2:5	0,37	0,37	0,00	0,88
1:3	0,33	0,33	0,00	0,79
1:4	0,29	0,28	0,01	0,72
1:5 - 1:30	0,09	0,09	0,00	0,91

(Fuente: Lin et al., 2008)

Análisis matemático a la formula para calcular la ZPL



Hb = Altura de ola rompiente (m)

db = Profundidad donde ocurre la rotura del oleaje (m)

x = Angulo de inclinación de la playa ($^{\circ}$)

Relación trigonométrica:

$$A) \tan(x) = m = \frac{db}{AZR}$$

Criterio de rotura McCowan (1894):

$$B) Hb = 0,78 * db \leftrightarrow db = 1,28 * Hb$$

Ancho Zona de Rotura:

$$AZR = \frac{1,28 * Hb}{m}$$

Influencia del coeficiente P

$$H_b = (10,02m^3 - 7,46m^2 + 1,32m + 0,55) * \begin{matrix} \nearrow P \\ \searrow H_o \left[\frac{H_o}{L_o} \right]^{-1/5} \end{matrix}$$

\nearrow Interpolación Lineal
 \searrow Spline Cubico

Tabla del Coeficiente P tabulado

Latitud	P
18°S	7,54
20°S	7,79
24°S	7,95
27°S	8,27
30°S	9,07
33°S	9,57
35°S	10,50
37°S	10,74
42°S	12,06
53°S	14,61

(Fuente: Circular A-53/004, 2012)

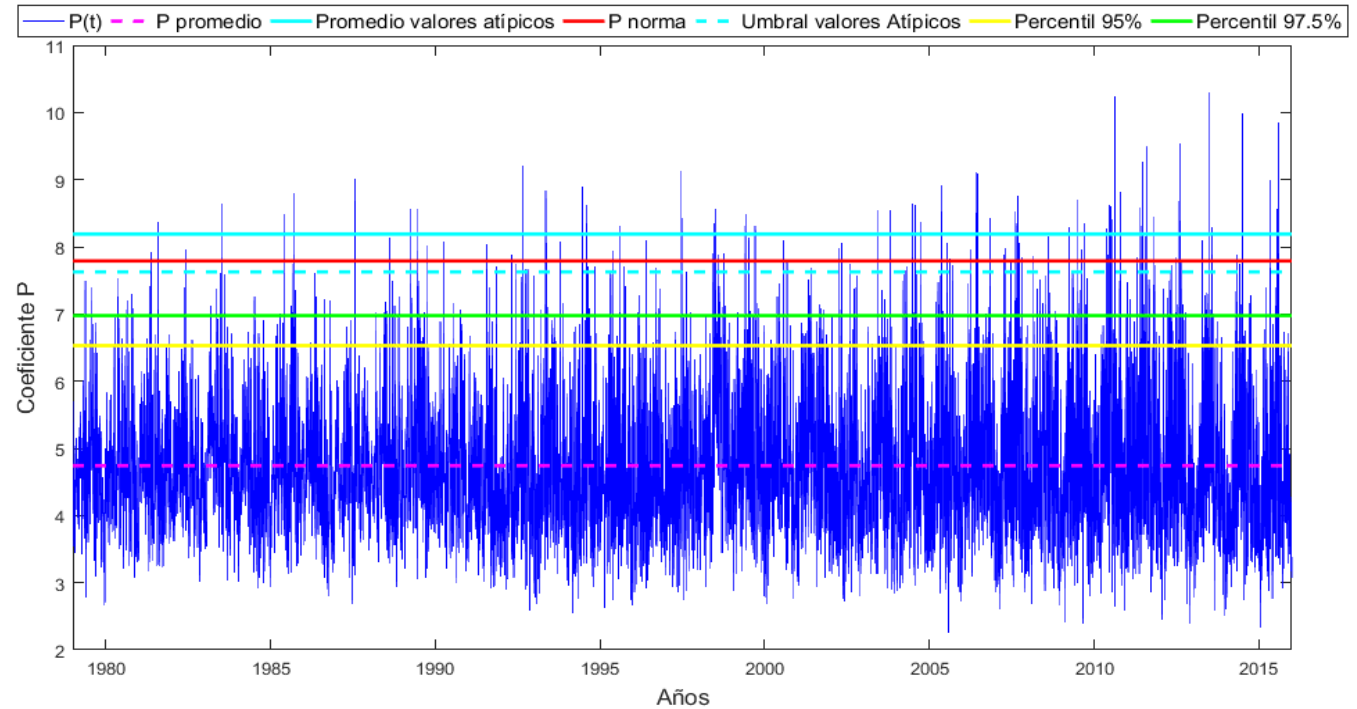
- Diferencia % de ZPL c/coef P vs ZPL s/coef P.
- Diferencia % entre interpolación lineal vs Spline cubico.

Análisis Estadístico

- Promedio de P
- Desviación estándar
- El umbral de valores atípicos
- Promedio de los valores atípicos
- Percentiles 95 y 97,5 de P

$$P = H_o \left[\frac{H_o}{L_o} \right]^{\frac{-1}{5}}$$

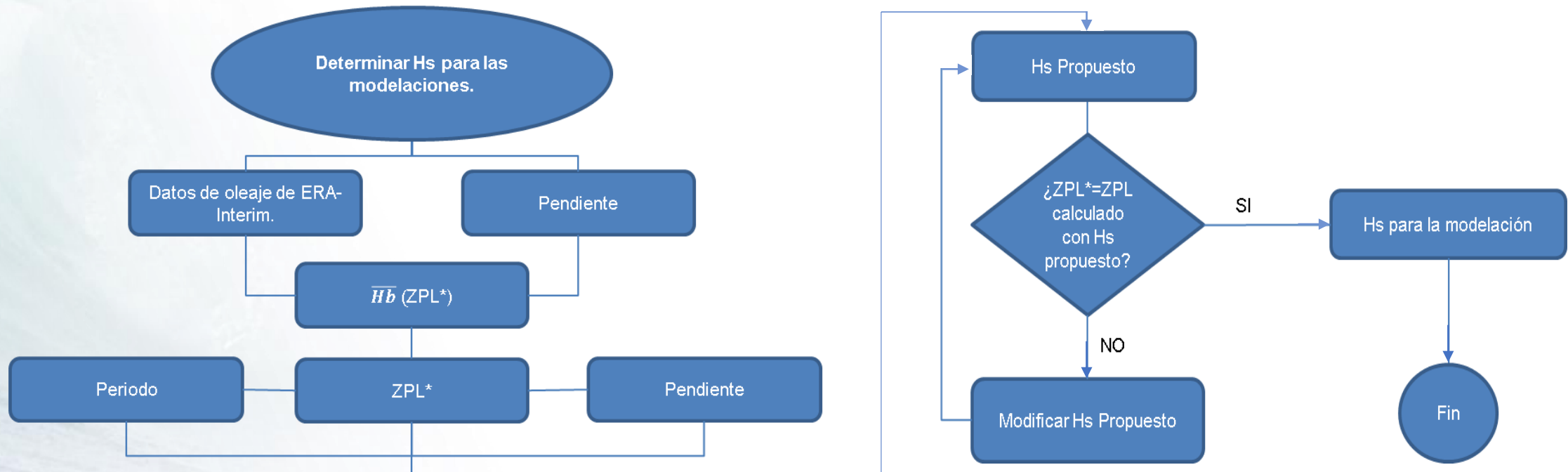
Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S



(Fuente : Elaboración Propia)

Modelación numérica con SMS

Parámetros de oleaje



ZPL*= Valor inicial de iteración

Periodos: 8 s, 12 s y 16 s

Direcciones: 0°, ±15°, ±30°

Alturas Significativas: 2.8 m, 2.3 m, 2 m

Modelación numérica con SMS

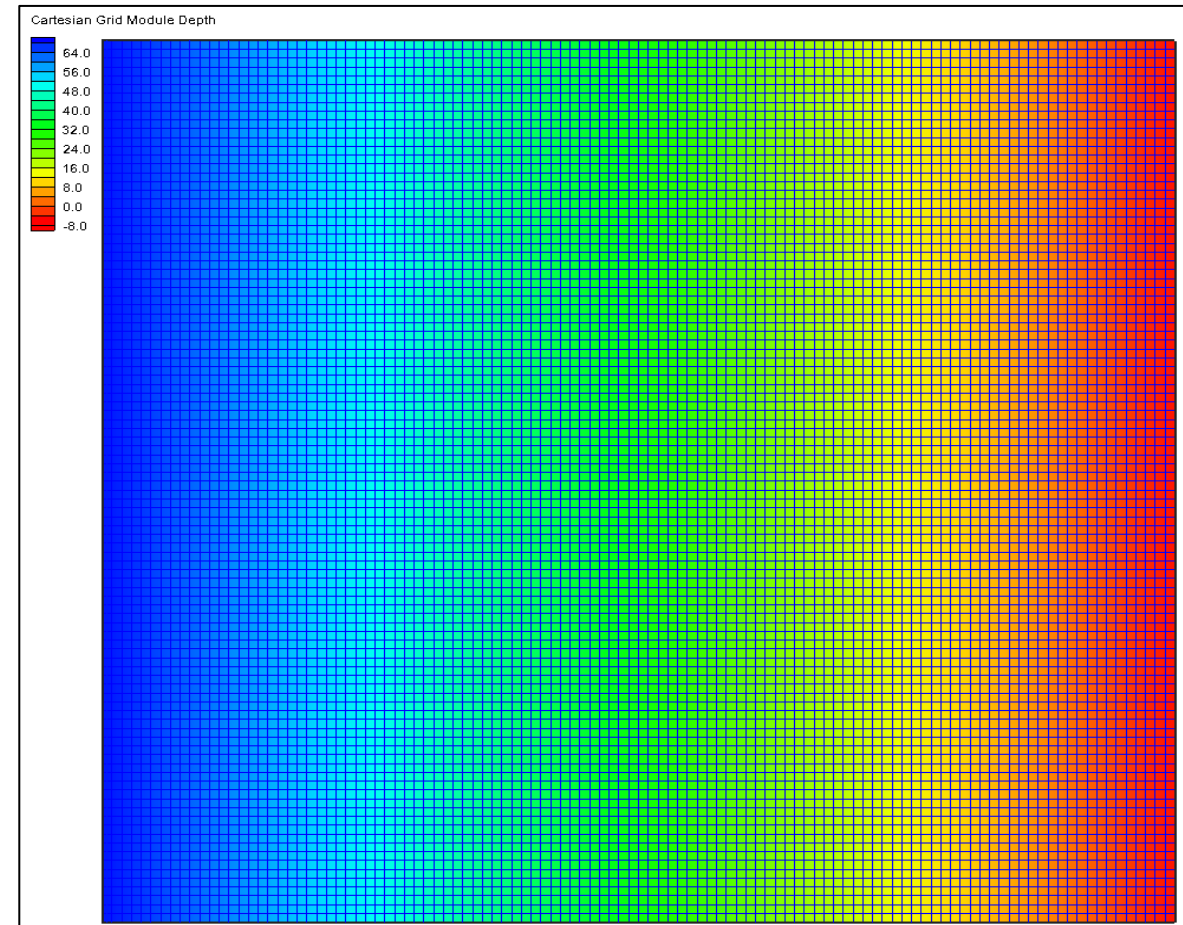
Batimetría y grilla de cálculo

- Perfil prismático.
- Pendiente plana y uniforme.
- Grilla regular.

Tabla resumen de batimetría

Pendiente	Lx (m)	Ly (m)	dx (m)	dy (m)
0,07	1100	1000	10	10
0,10	1050	1000	10	10
0,44	1050	1000	10	10

(Elaboración propia)

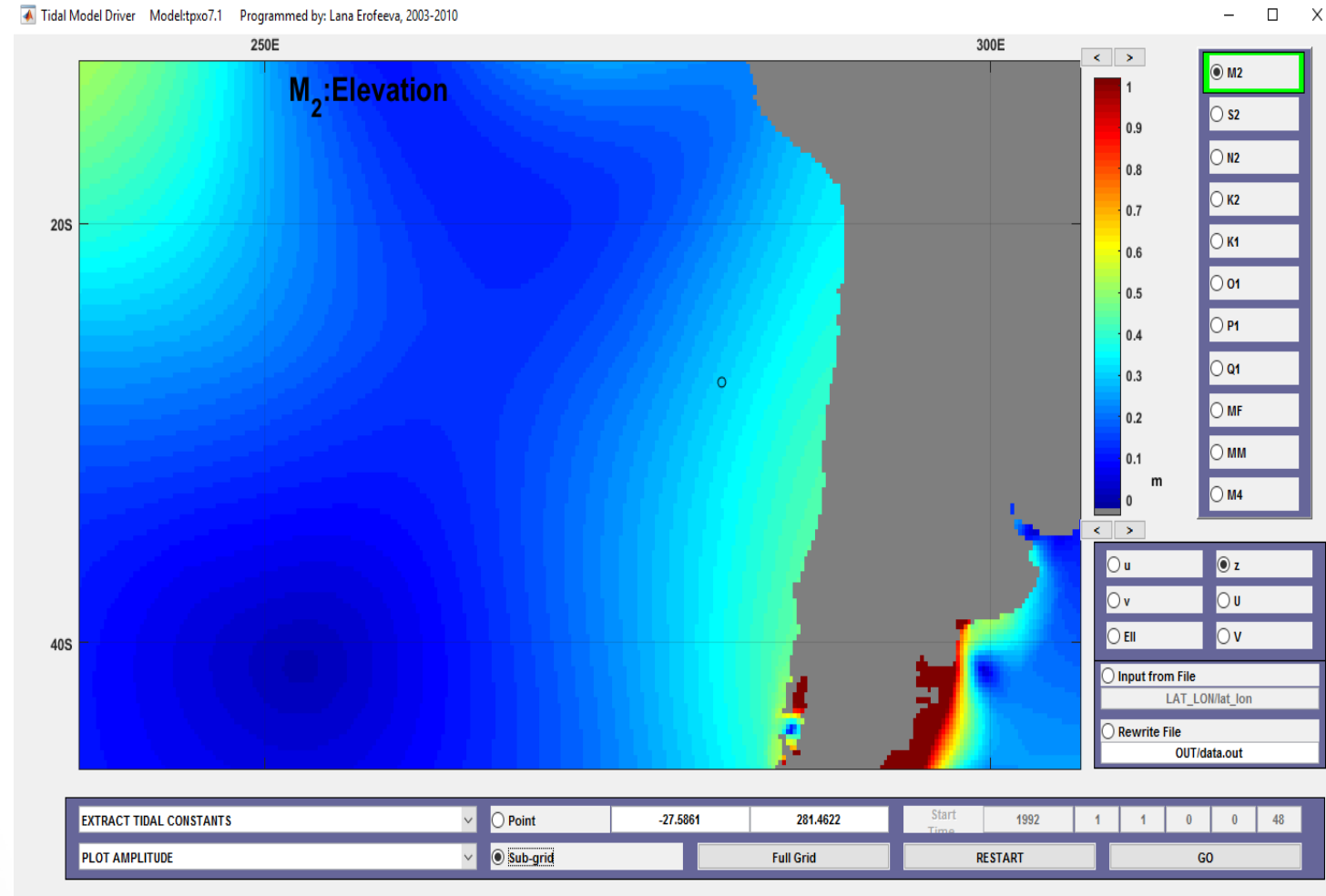


Grilla de calculo para CMS-Flow
(Elaboración propia)

Modelación numérica con SMS

Marea

- Componente armónico M2
- Periodo de 12,42 horas
- La más importante energéticamente (Pugh, 1987)
- Sicigia con amplitud de 0,6 [m] y Cuadratura con amplitud de 0,2 [m]



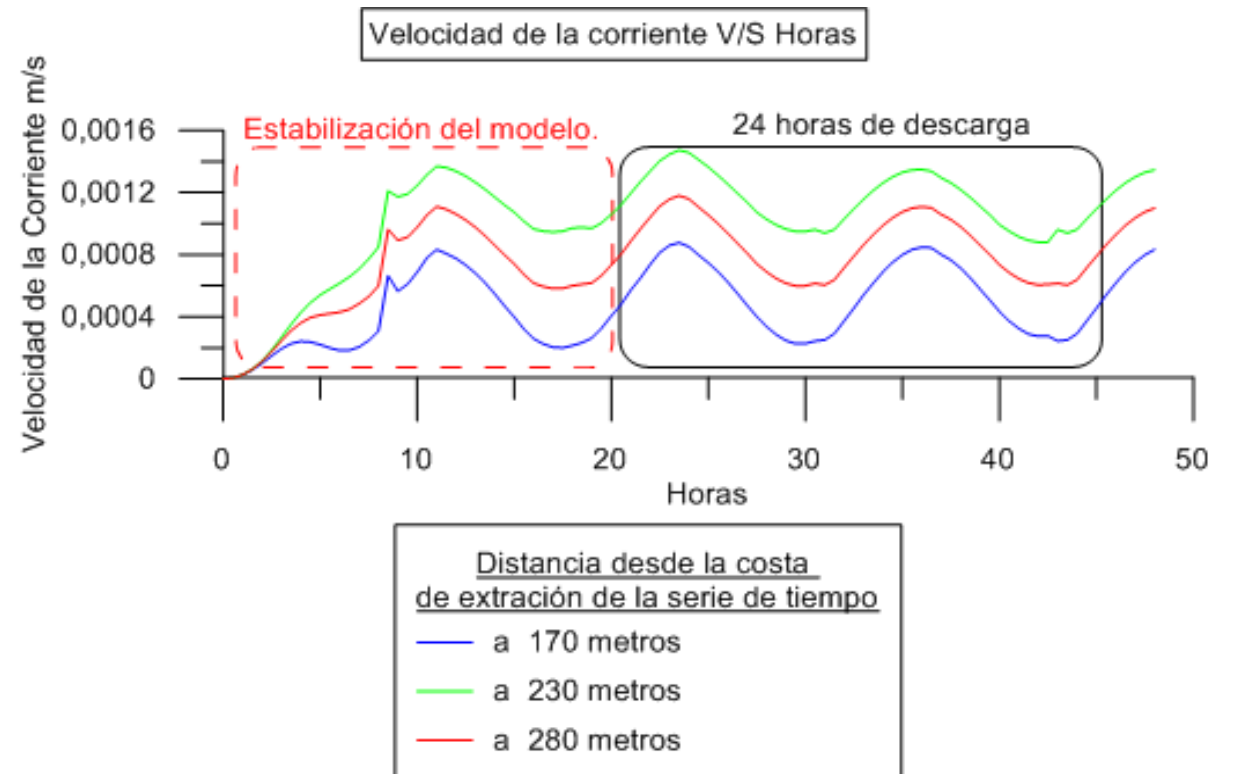
Modelación numérica con SMS

Partículas

- Boyantes Negativa y partícula pasiva
- Flujo de descarga 0,05 kg/s
- Peso por partícula 0,05 kg
- Modelación de Campo lejano

Tiempo de modelación

- 48 horas
- 24 horas de extracción de datos
- 24 horas de estabilización del modelo



Velocidad de la corriente transversal de 48 horas de simulación en CMS-Flow
(Fuente: Elaboración Propia)

Modelación numérica con SMS

Resumen

Parámetros finales utilizados en las modelaciones según pendiente

Pendiente	Periodo (s)	Hs (m)	Dirección (°)	Condición de marea (m)	ZPL (m)	Distancia de descarga (m)
0,07	8	2,8	0	0,2 (Cuadratura)	102,0	108
	12	2,3	±15	0,6 (Sicigia)	102,5	108
	16	2,0	±30		102,8	108
0,10	8	2,8	0	0,2 (Cuadratura)	72,4	73
	12	2,3	±15	0,6 (Sicigia)	72,7	73
	16	2,0	±30		72,9	73
0,44	8	2,8	0	0,2 (Cuadratura)	14,4	15
	12	2,3	±15	0,6 (Sicigia)	14,5	15
	16	2,0	±30		14,5	15

(Fuente: Elaboración propia)

Distancia de descarga según ZPL y pendiente

Pendiente	ZPL (m)	Distancia de descarga (m)
0,07	102	108
0,10	73	73
0,44	14,5	15

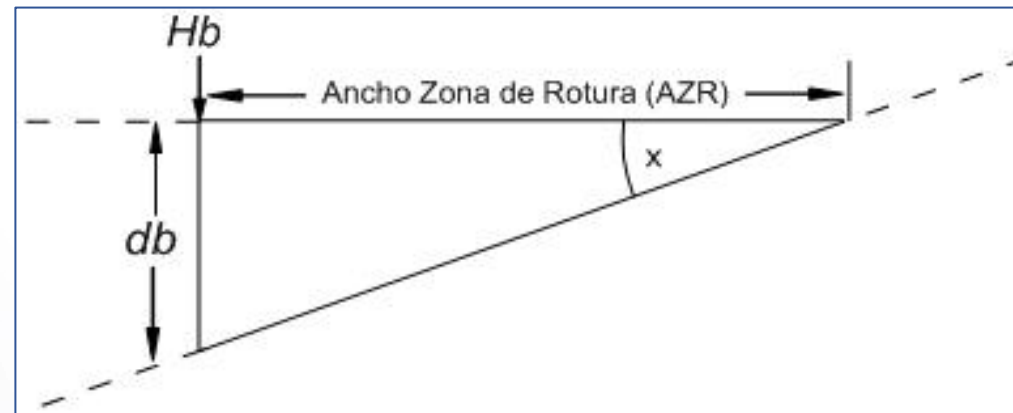
(Fuente: Elaboración propia)



Análisis de Resultados

Relación entre la ZPL y el AZR

Análisis Matemático

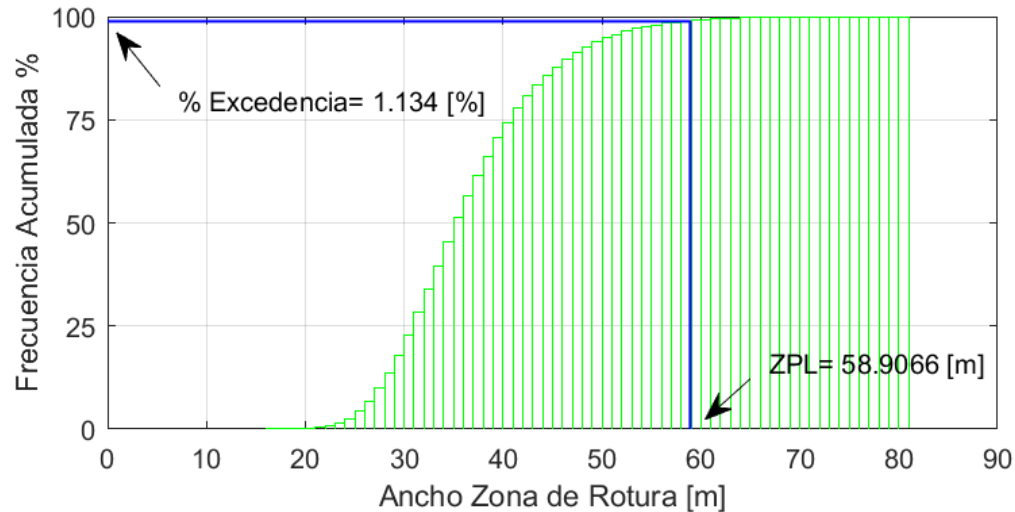


Esquema calculo Ancho Zona de Rotura
(Fuente: Elaboración propia)

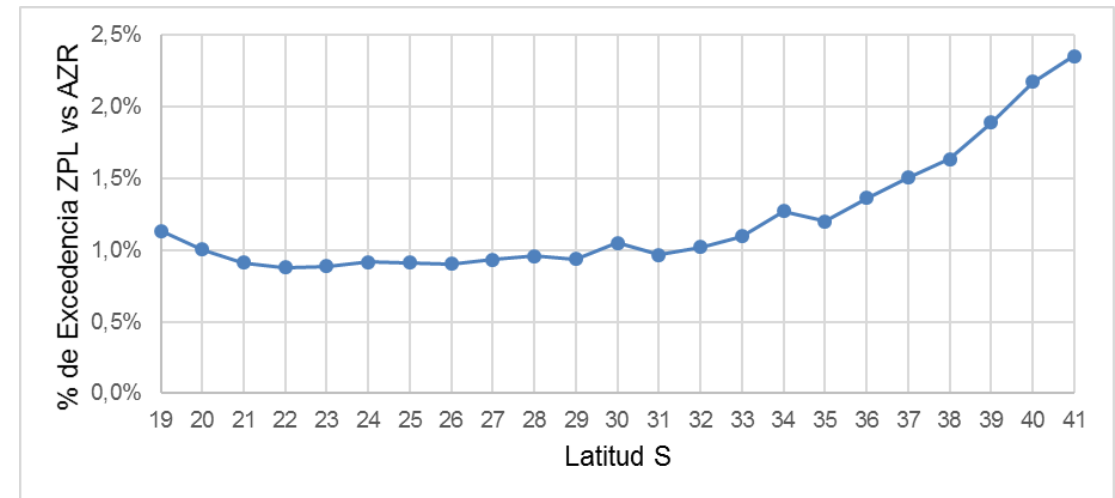
$$AZR = \left[\frac{1,28 * H_b}{m} \right] \leftrightarrow ZPL = \underbrace{\left[\frac{1,28 * \overline{H_b}}{m} \right]}_{AZR} * 1,6 \rightarrow ?$$

Relación entre el AZR y la ZPL

Porcentaje de excedencia



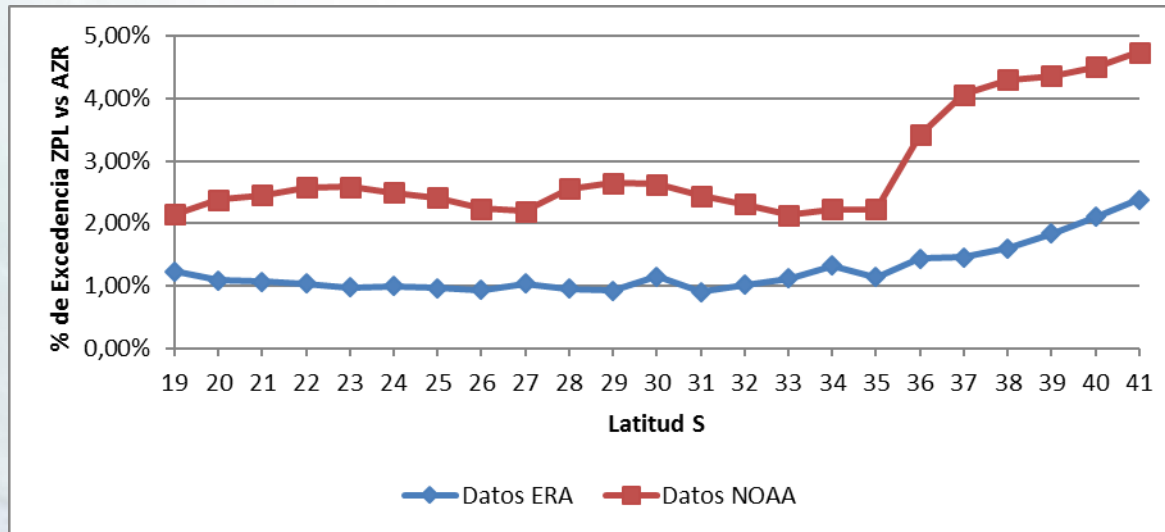
Obtención del porcentaje de excedencia para el nodo 19S
(Fuente: Elaboración propia)



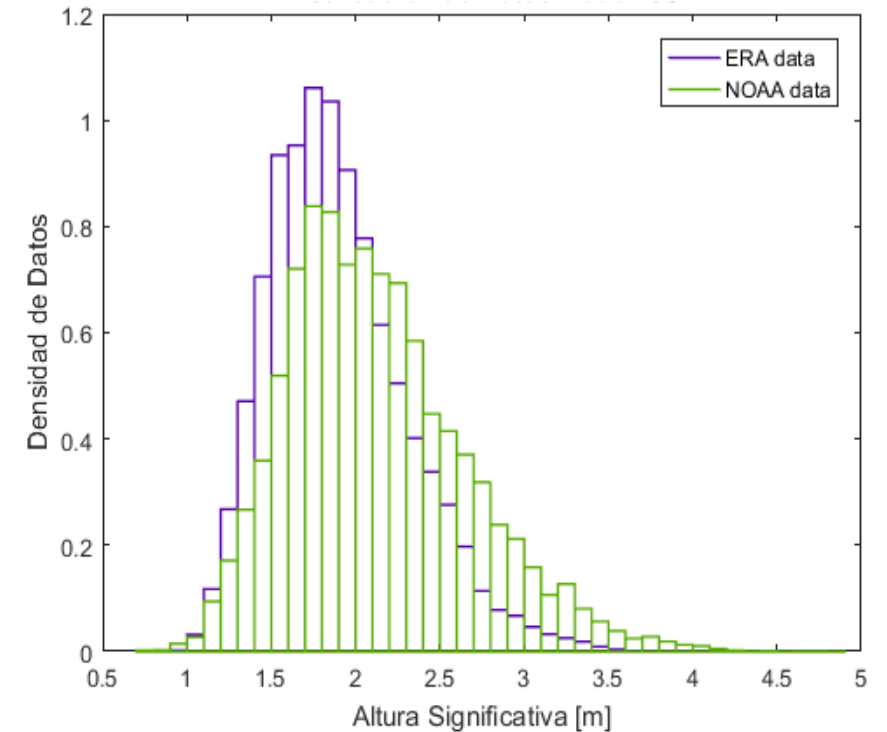
Porcentaje de excedencia por nodo, datos ERA-Interim
(Fuente: Elaboración propia)

Relación entre el AZR y la ZPL

Porcentaje de excedencia



Comparación % de excedencia datos ERA v/s NOAA desde 1997 a 2010.
 (Fuente: Elaboración propia)

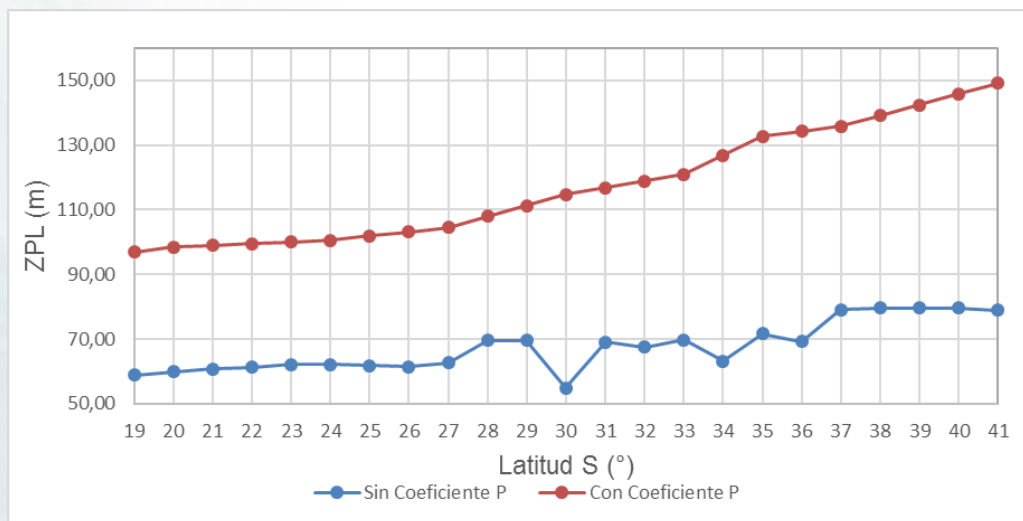


Comparación de distribución de alturas significativas ERA vs NOAA.
 (Fuente: Elaboración propia)

Influencia del coeficiente P

Diferencias porcentuales al calcular la ZPL con el coeficiente P

Uso del Coeficiente P



Diferencia de ZPL s/coef P vs ZPL c/coef P para una pendiente igual a 0,1
 (Fuente: Elaboración propia)

Latitud S	Zona	Diferencia % base en coeficiente P		
		Pendiente		
		0,07	0,1	0,44
19	Arica	39%	39%	39%
20	Tarapacá 1	39%	39%	39%
21	Tarapacá 2	39%	39%	39%
22	Antofagasta 1	38%	38%	38%
23	Antofagasta 2	38%	38%	38%
24	Antofagasta 3	38%	38%	38%
25	Antofagasta 4	39%	39%	39%
26	Antofagasta 5	41%	41%	41%
27	Atacama 1	40%	40%	40%
28	Atacama 2	35%	35%	35%
29	Atacama 3	37%	37%	37%
30	Coquimbo 1	52%	52%	52%
31	Coquimbo 2	41%	41%	41%
32	Coquimbo 3	43%	43%	43%
33	Valparaíso	42%	42%	42%
34	O'Higgins	50%	50%	50%
35	Maule 1	46%	46%	46%
36	Maule 2	48%	48%	48%
37	Biobío 1	42%	42%	42%
38	Biobío 2	43%	43%	43%
39	Araucanía	44%	44%	44%
40	Los Ríos	45%	45%	45%
41	Los Lagos	47%	47%	47%

(Fuente: Elaboración propia)

Influencia del coeficiente P

Interpolación lineal y aplicación de *splines* cúbicos

Diferencias entre interpolación lineal y *spline* cubico para una pendiente de 0,1

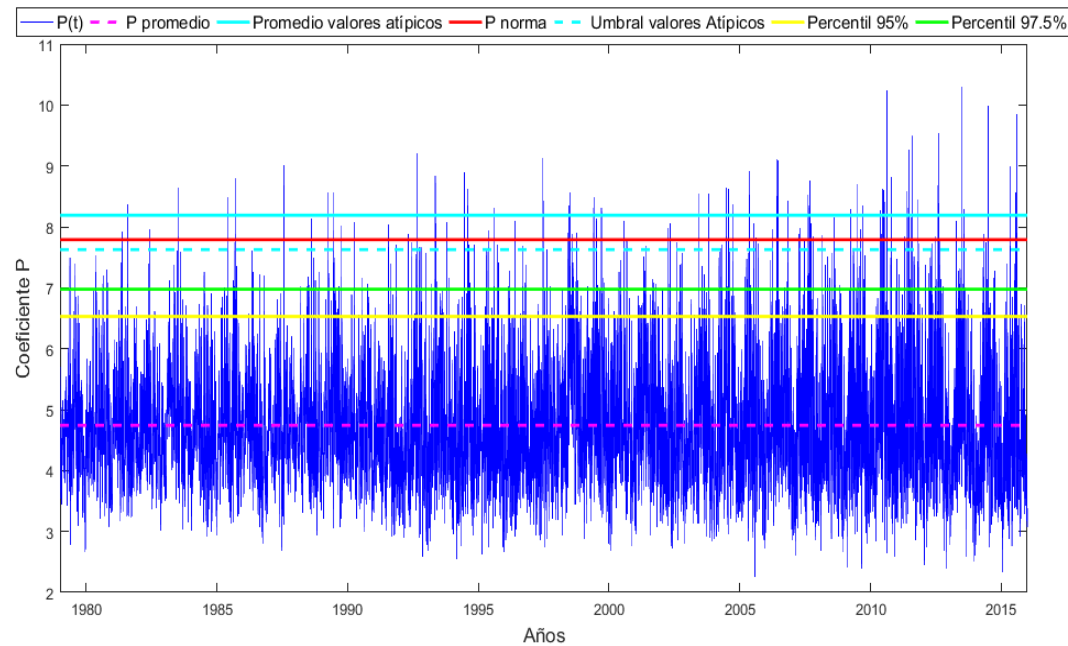
Interpolación Lineal				<i>Spline</i> Cúbico			
Latitud °S	Coef. P	Hb con tabulación	Ancho ZPL	Natural	Parabólica	Periódica	Hermite
				Diferencia con interpolación lineal			
19	7,67	4,73	96,92	0,2%	0,3%	0,2%	0,2%
20	7,79	4,81	98,50	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
21	7,83	4,83	99,01	0,4%	0,3%	0,4%	0,4%
22	7,87	4,86	99,51	0,4%	0,3%	0,4%	0,4%
23	7,91	4,88	100,02	0,2%	0,1%	0,2%	0,2%
24	7,95	4,91	100,53	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
25	8,06	4,97	101,87	-0,8%	-0,7%	-0,7%	-0,8%
26	8,16	5,04	103,22	-0,9%	-0,9%	-0,9%	-0,9%
27	8,27	5,11	104,57	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
28	8,54	5,27	107,94	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%
29	8,80	5,44	111,32	0,4%	0,4%	0,4%	0,4%
30	9,07	5,60	114,69	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
31	9,24	5,70	116,80	-0,5%	-0,5%	-0,5%	-0,5%
32	9,40	5,81	118,90	-1,0%	-1,0%	-1,0%	-1,0%

Interpolación Lineal				<i>Spline</i> Cúbico			
Latitud °S	Coef. P	Hb con tabulación	Ancho ZPL	Natural	Parabólica	Periódica	Hermite
				Diferencia con interpolación lineal			
33	9,57	5,91	121,01	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
34	10,04	6,20	126,89	0,2%	0,2%	0,2%	0,2%
35	10,50	6,48	132,77	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
36	10,62	6,56	134,29	0,6%	0,6%	0,6%	0,6%
37	10,74	6,63	135,80	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
38	11,00	6,79	139,14	-1,2%	-1,2%	-1,2%	-1,2%
39	11,27	6,96	142,48	-1,4%	-1,5%	-1,5%	-1,4%
40	11,53	7,12	145,82	-1,1%	-1,2%	-1,2%	-1,1%
41	11,80	7,28	149,16	-0,6%	-0,6%	-0,6%	-0,6%

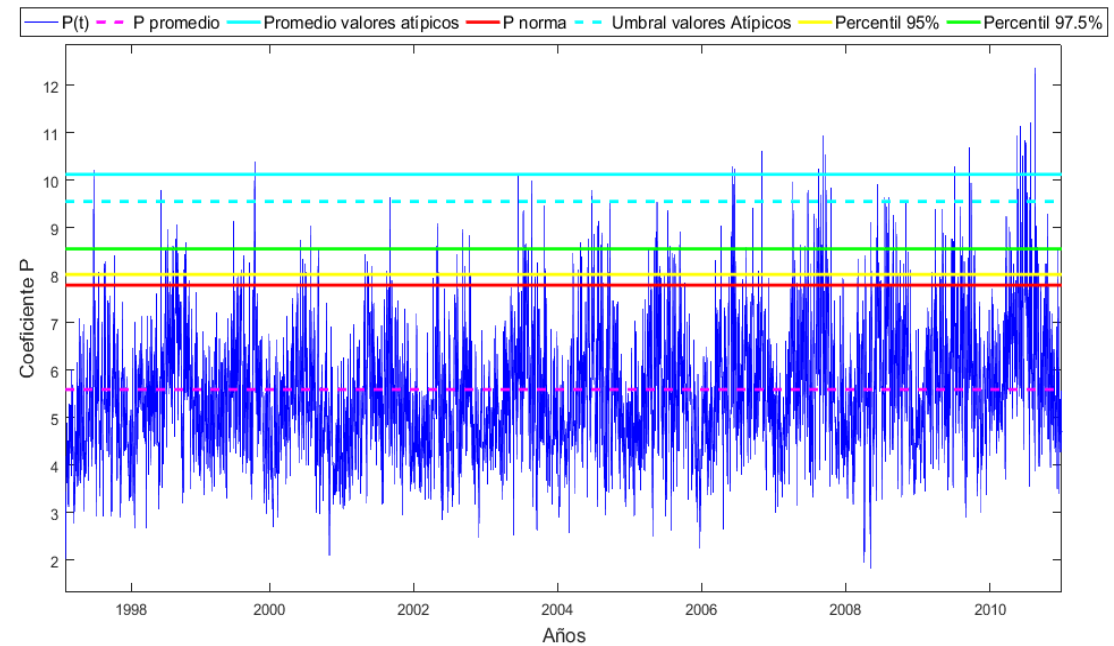
(Fuente: Elaboración propia)

Influencia del coeficiente P

Análisis estadístico



Análisis Estadístico del Coeficiente P, ERA nodo 20S
(Fuente: Elaboración propia)



Análisis Estadístico del Coeficiente P, NOAA nodo 20S
(Fuente: Elaboración propia)

Influencia del coeficiente P

Análisis estadístico

Base de datos ERA-Interim

Nodos	Coeficiente P	Diferencia con el Coeficiente P				
		Promedio de P	Valor Umbral	Promedio V.A.	Percentil 95%	Percentil 97,5%
20S	7,79	-3,05	-0,16	0,40	-1,26	-0,81
24S	7,95	-3,03	-0,08	0,49	-1,22	-0,76
27S	8,27	-3,32	-0,30	0,30	-1,47	-1,03
30S	9,07	-4,73	-2,01	-1,42	-3,08	-2,68
33S	9,57	-4,05	-0,46	0,22	-1,91	-1,39
35S	10,50	-4,83	-1,07	-0,36	-2,60	-2,06
37S	10,74	-4,49	-0,18	0,63	-1,89	-1,25

(Fuente: Elaboración propia)

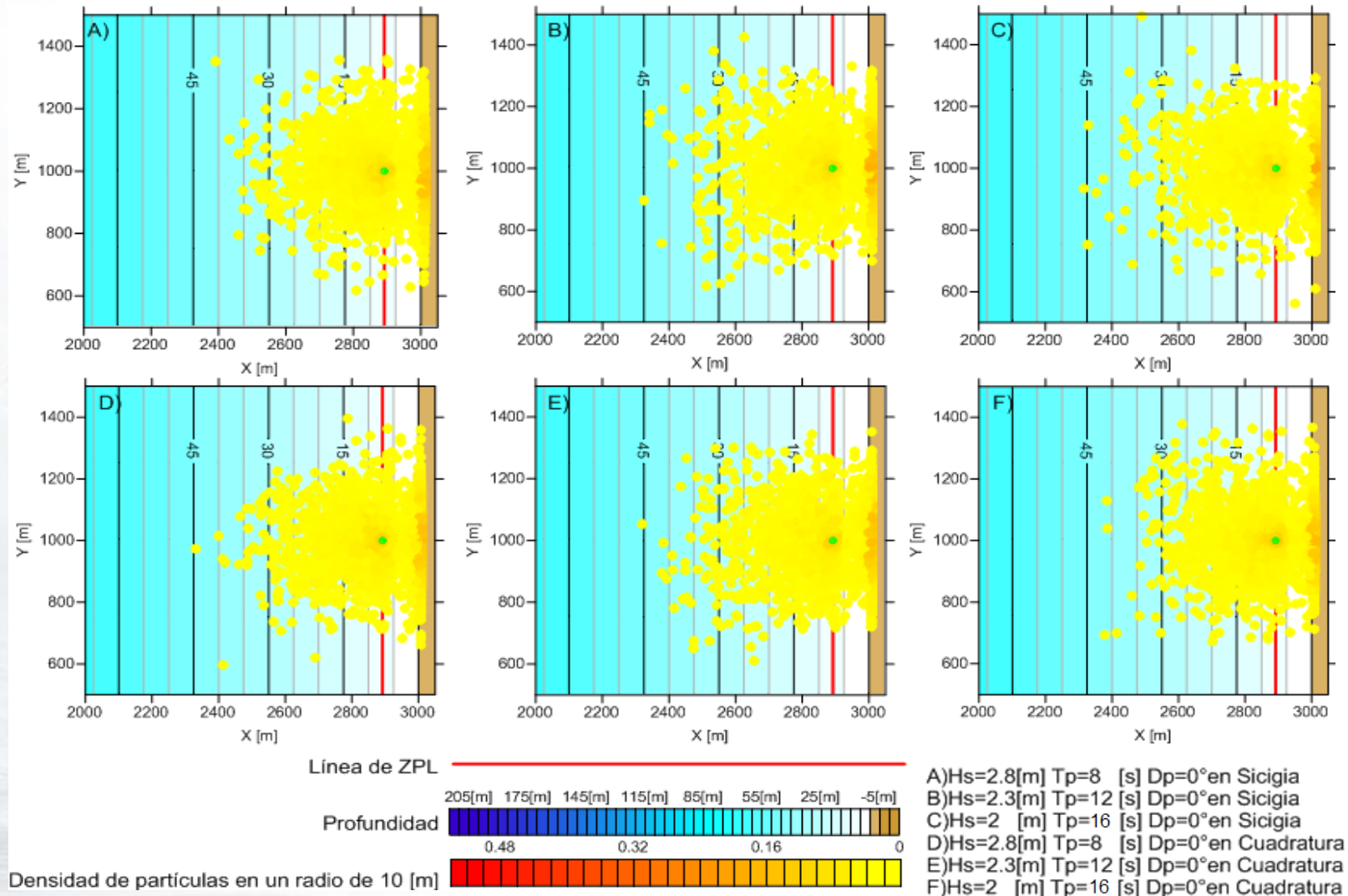
Base de datos NOAA

Nodos	Coeficiente P	Diferencia con el Coeficiente P				
		Promedio de P	Valor Umbral	Promedio V.A.	Percentil 95%	Percentil 97,5%
20S	7,79	-2,20	1,76	2,33	0,22	0,76
24S	7,95	-2,14	2,00	2,66	0,37	0,96
27S	8,27	-2,94	0,83	1,46	-0,69	-0,13
30S	9,07	-2,64	2,10	2,83	0,27	0,85
33S	9,57	-3,53	0,98	1,78	-0,85	-0,23
35S	10,5	-4,79	-0,46	0,41	-2,22	-1,61
37S	10,74	-3,67	2,05	3,11	-0,11	0,68

(Fuente: Elaboración propia)

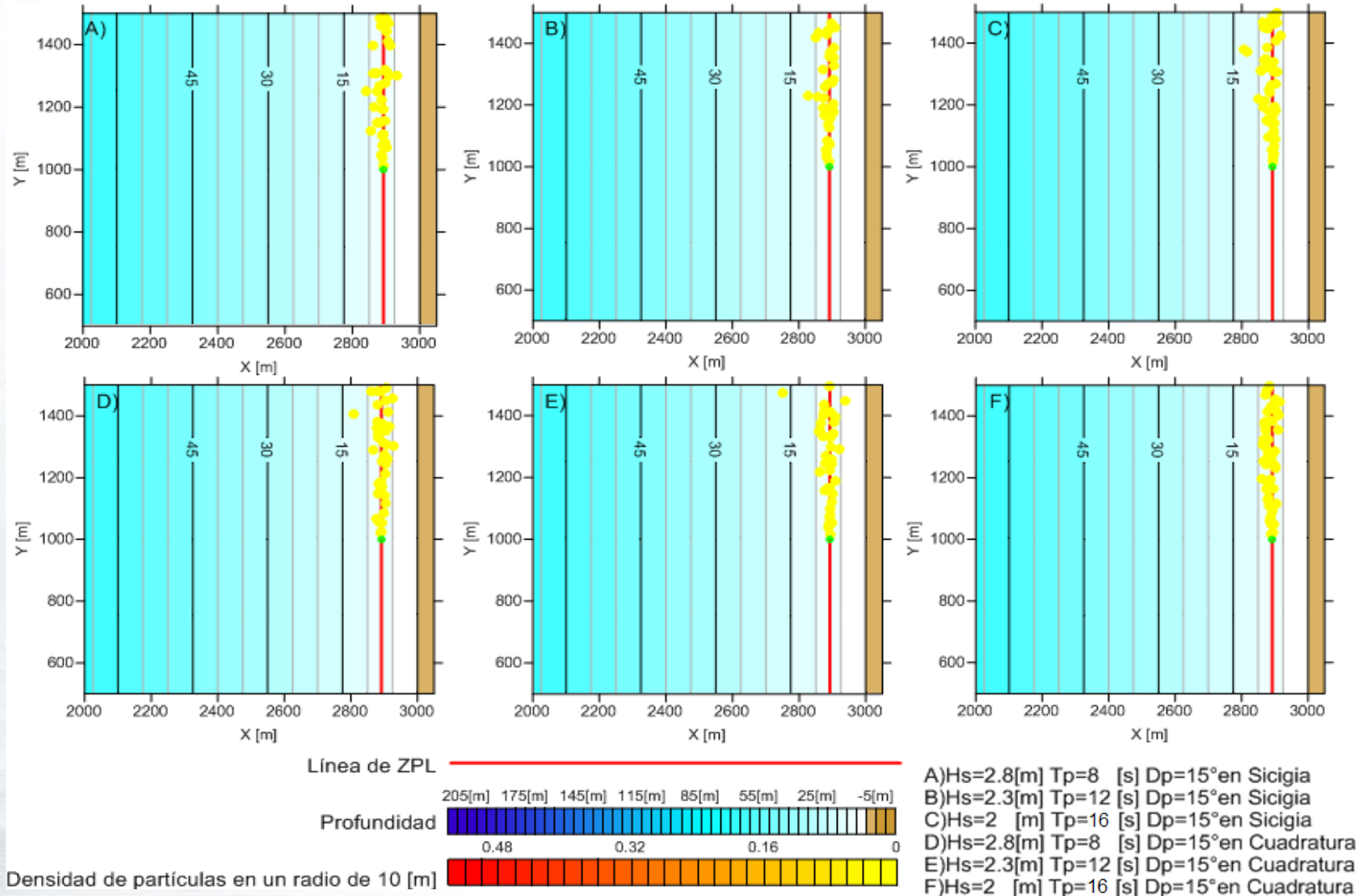
Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,07



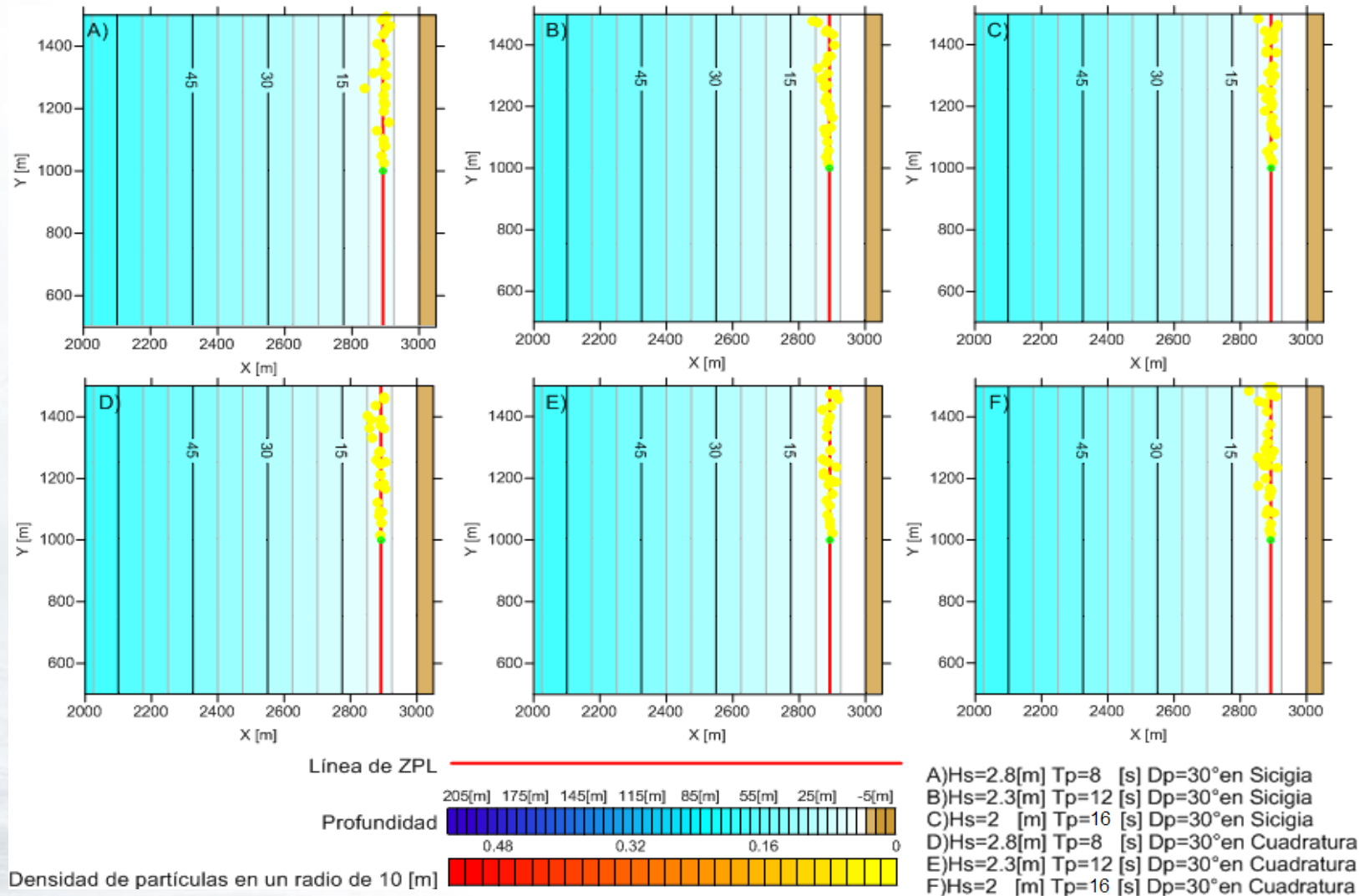
Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,07



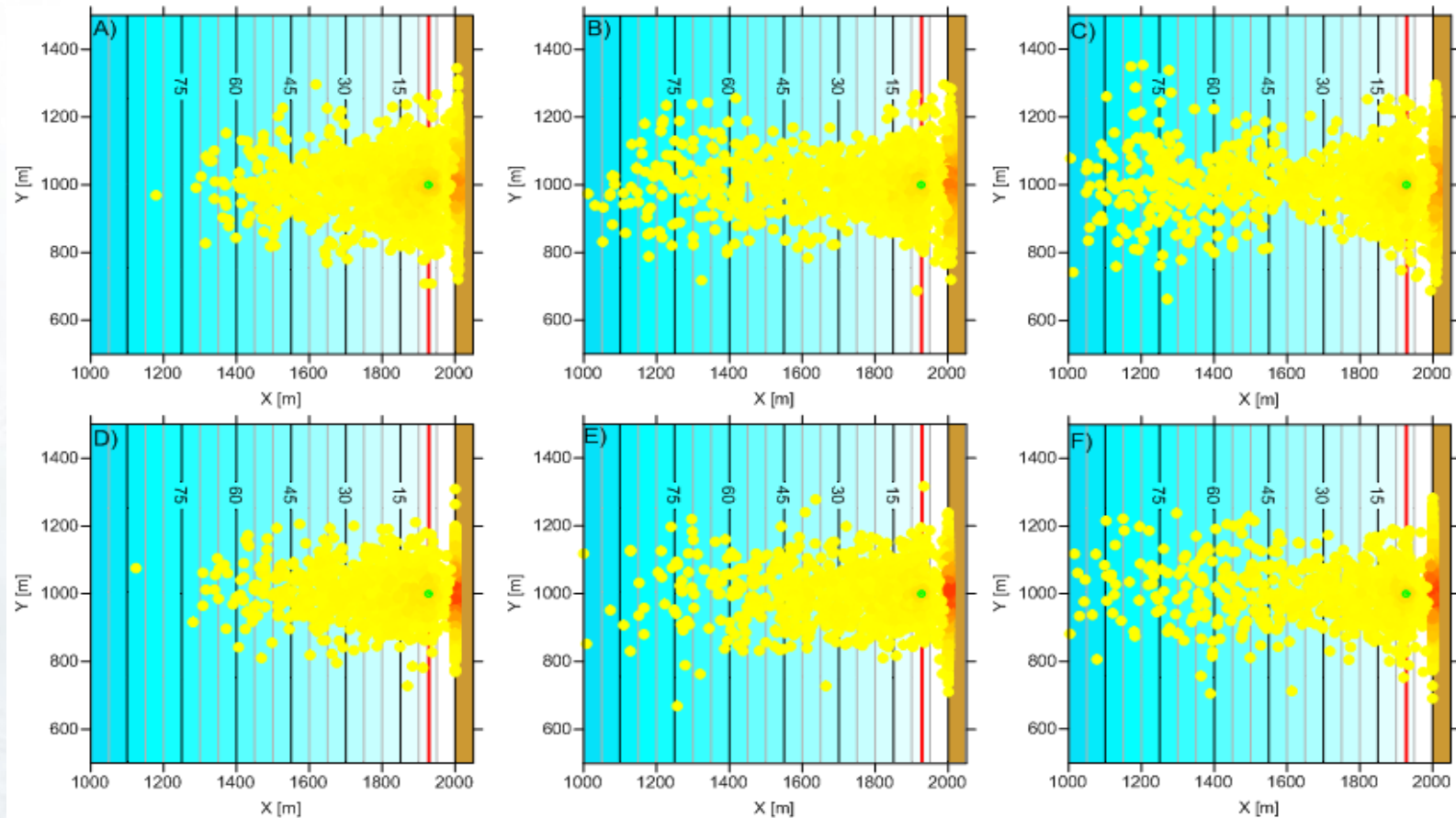
Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,07

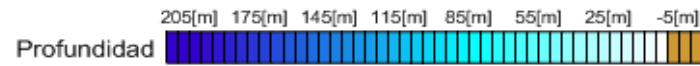


Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,1



Línea de ZPL



Profundidad

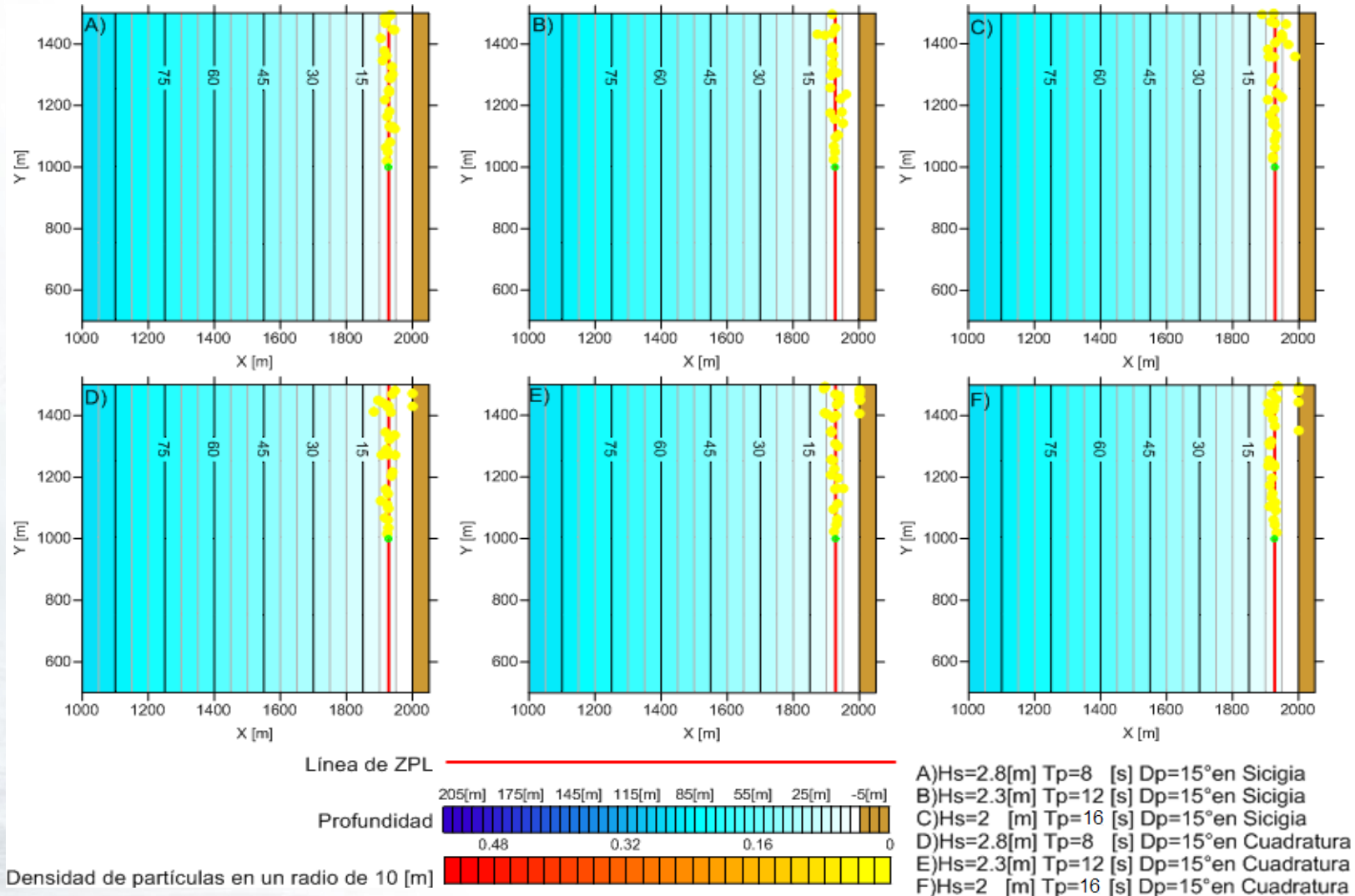


Densidad de partículas en un radio de 10 [m]

- A) $H_s=2.8[m]$ $T_p=8 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Sicigia
- B) $H_s=2.3[m]$ $T_p=12 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Sicigia
- C) $H_s=2 [m]$ $T_p=16 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Sicigia
- D) $H_s=2.8[m]$ $T_p=8 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Cuadratura
- E) $H_s=2.3[m]$ $T_p=12 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Cuadratura
- F) $H_s=2 [m]$ $T_p=16 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Cuadratura

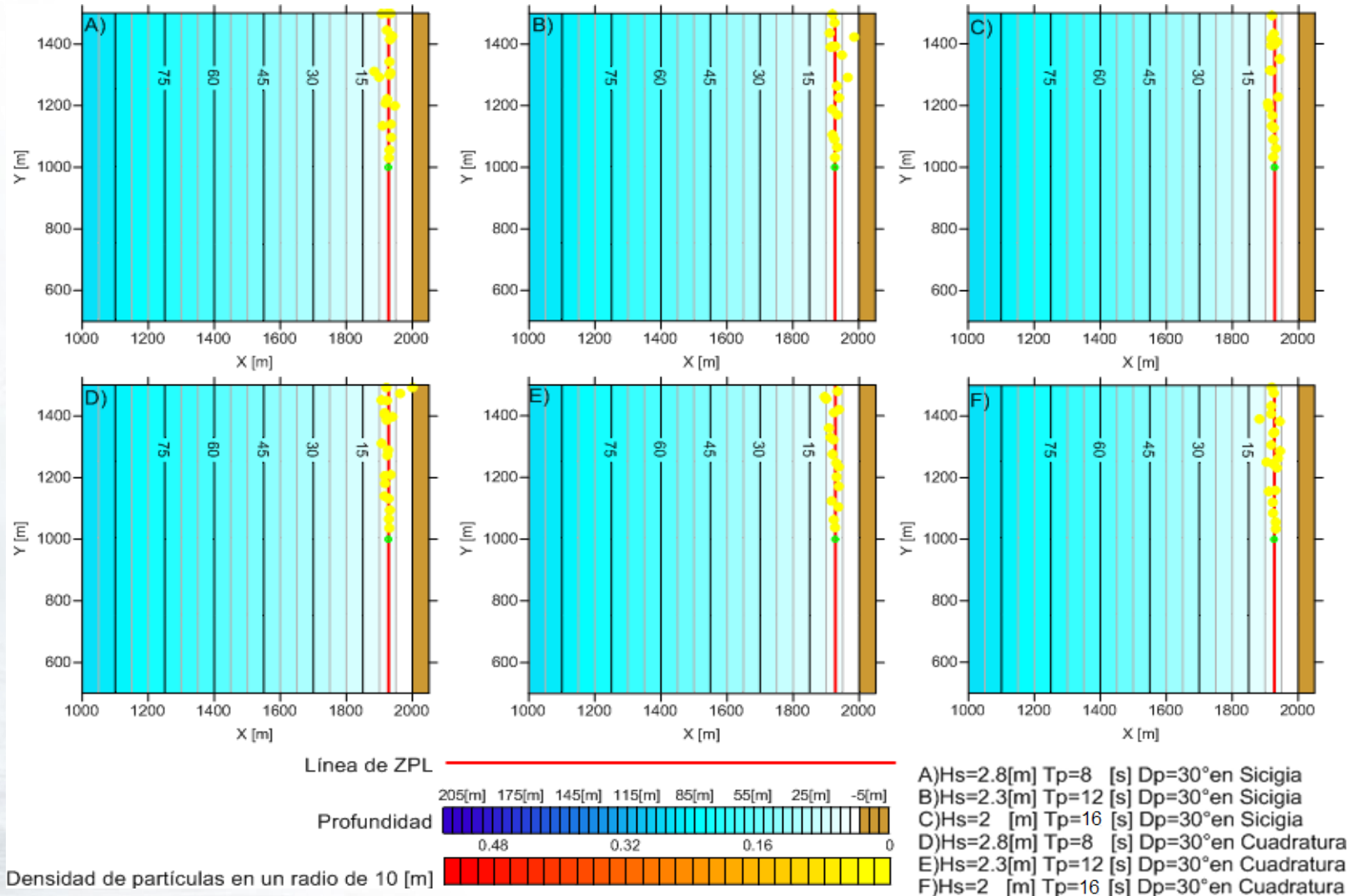
Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,1



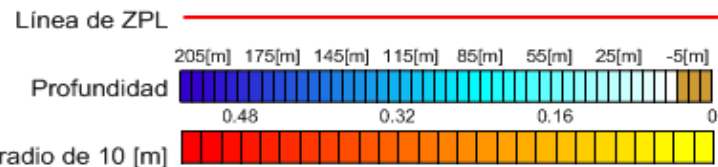
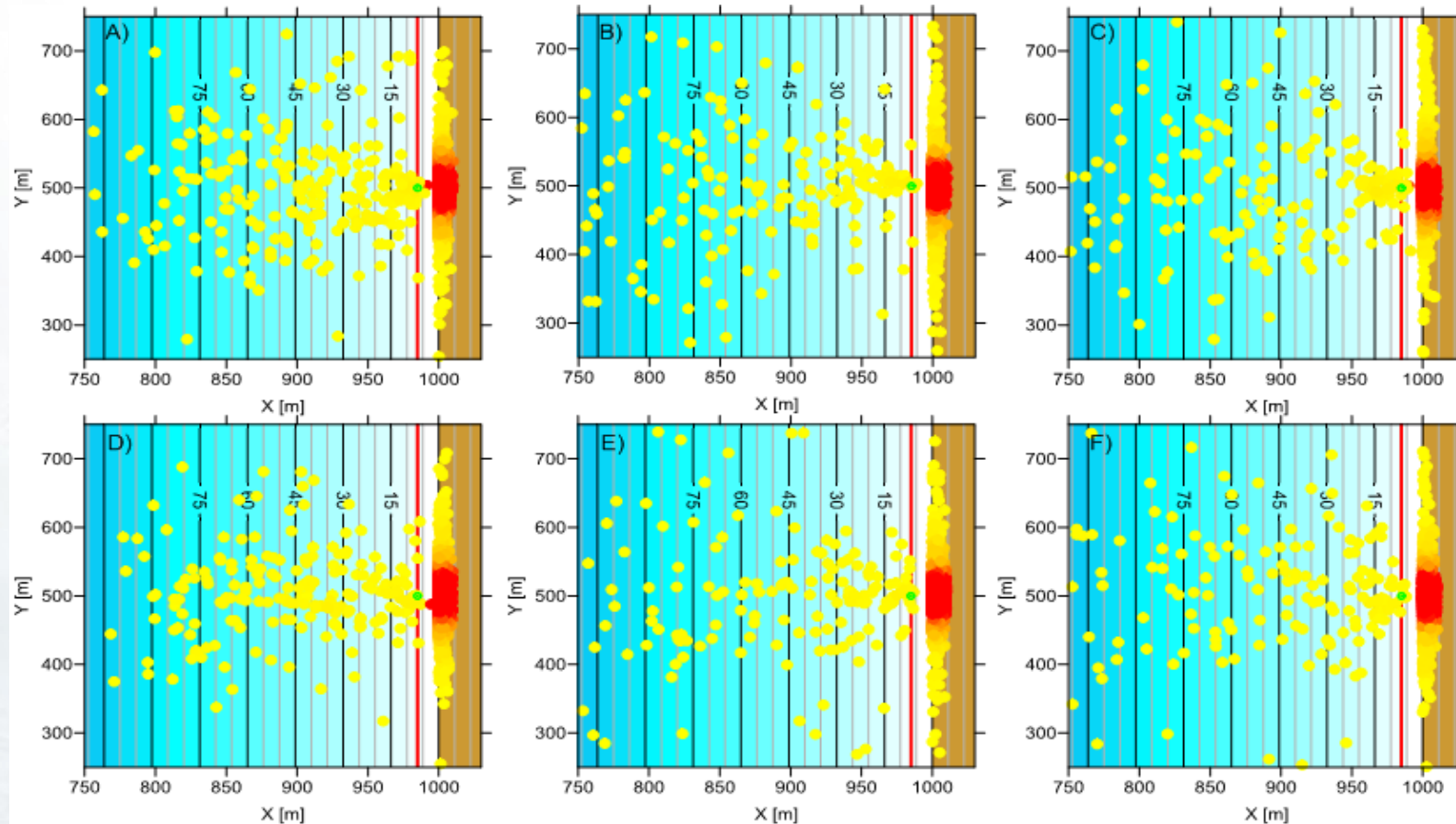
Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,1



Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,44

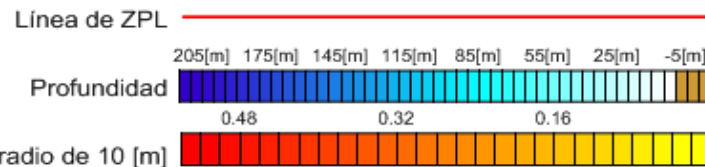
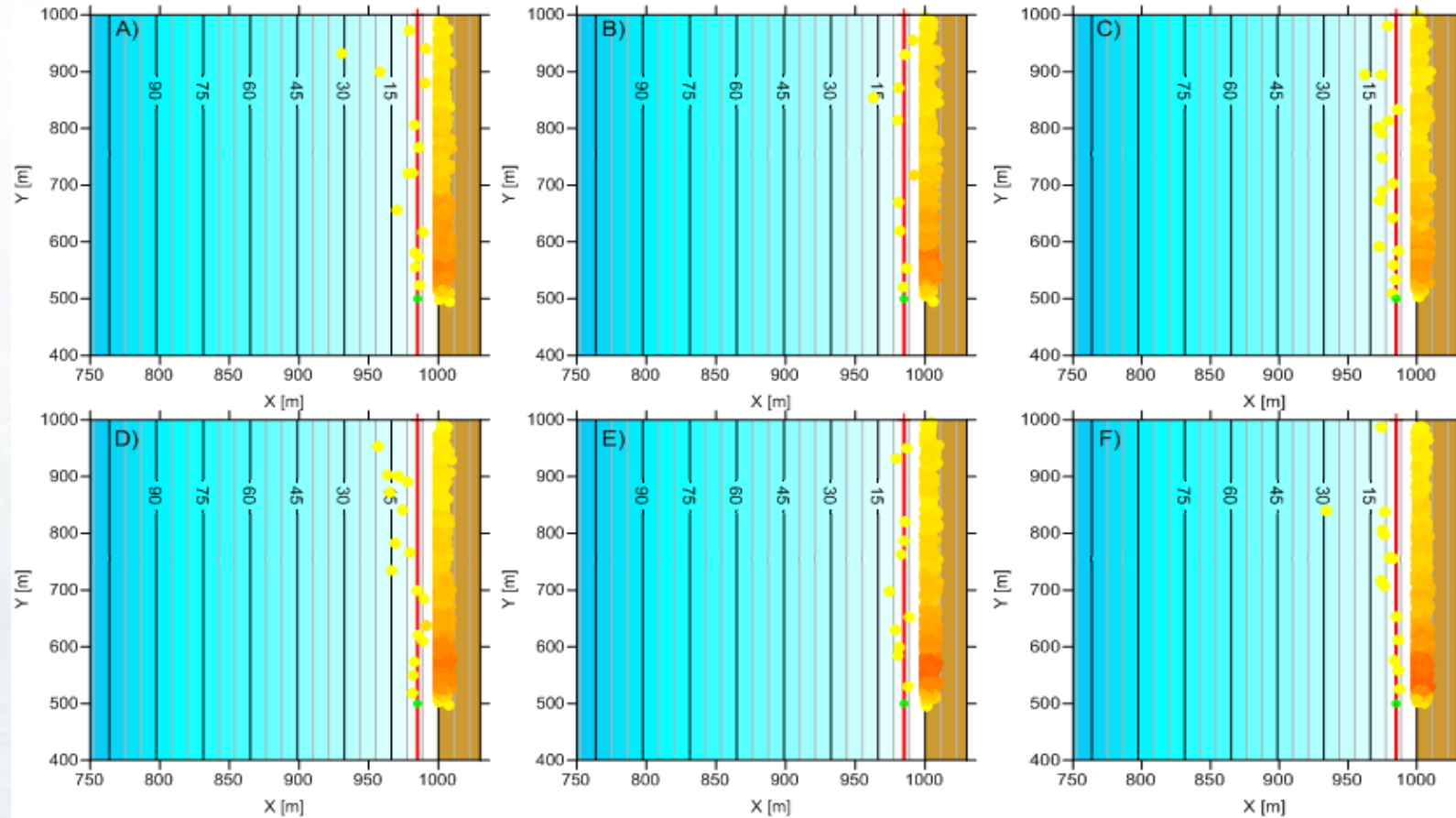


- A) $H_s=2.8[m]$ $T_p=8 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Sicgia
- B) $H_s=2.3[m]$ $T_p=12 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Sicgia
- C) $H_s=2 [m]$ $T_p=16 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Sicgia
- D) $H_s=2.8[m]$ $T_p=8 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Cuadratura
- E) $H_s=2.3[m]$ $T_p=12 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Cuadratura
- F) $H_s=2 [m]$ $T_p=16 [s]$ $D_p=0^\circ$ en Cuadratura

Densidad de partículas en un radio de 10 [m]

Modelación numérica con SMS

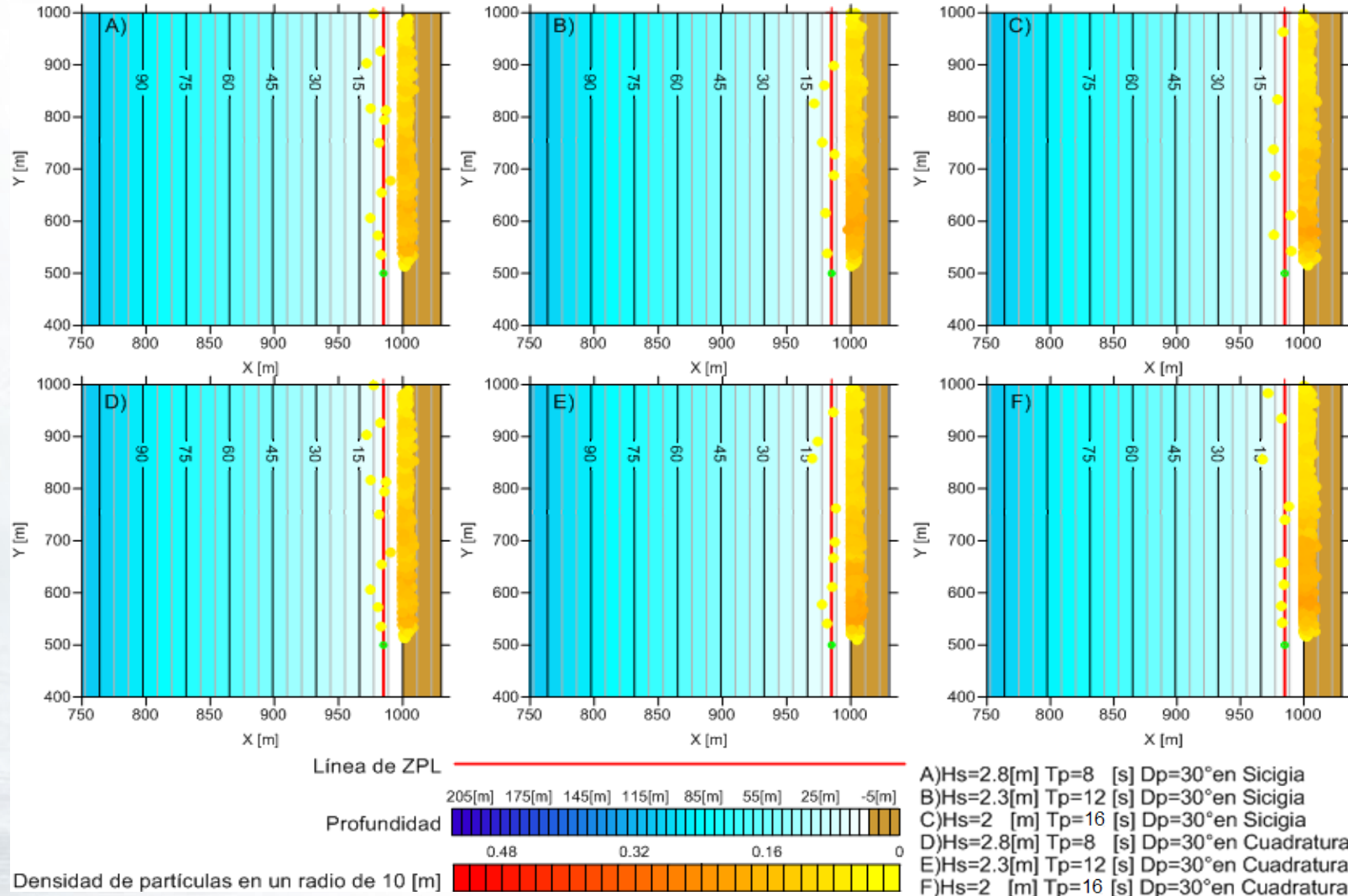
Pendiente de 0,44



- A) $H_s=2.8$ [m] $T_p=8$ [s] $D_p=15^\circ$ en Sicigia
- B) $H_s=2.3$ [m] $T_p=12$ [s] $D_p=15^\circ$ en Sicigia
- C) $H_s=2$ [m] $T_p=16$ [s] $D_p=15^\circ$ en Sicigia
- D) $H_s=2.8$ [m] $T_p=8$ [s] $D_p=15^\circ$ en Cuadratura
- E) $H_s=2.3$ [m] $T_p=12$ [s] $D_p=15^\circ$ en Cuadratura
- F) $H_s=2$ [m] $T_p=16$ [s] $D_p=15^\circ$ en Cuadratura

Modelación numérica con SMS

Pendiente de 0,44



Conclusiones

1. La ZPL está **asociada** al AZR.
2. La ZPL es **igual** al AZR multiplicada por 1,6.
3. La relación entre ZPL y AZR, es que permite de forma anticipada a cualquier estudio de dinámica costera, obtener una **aproximación empírica** en terreno de la ZPL.
4. La distribución de los AZR **dependerá de la distribución del oleaje** que se obtenga en base de datos del modelo de hindcasts.

Conclusiones

5. La **interpolación lineal es la mejor forma** de interpolar los valores del coeficiente P para calcular la ZPL.
6. Las modelaciones numericas indicaron que las partículas liberadas en un punto próximo a la ZPL, **ingresaban a esta**, bajo distintas condiciones de oleaje, pendiente del fondo marino y condición de marea.
7. Al utilizar **el coeficiente P** para calcular la ZPL, se logran resultados mucho más conservadores que los calculados sin considerar este coeficiente, esto implica que la **ZPL nunca se ve superada por el AZR**. El objetivo de la norma de asegurar la calidad del agua para los diversos usos y actividades que se desarrollan dentro de la ZPL **se cumple**.



Muchas Gracias