



## Reporte ejecutivo

### Análisis del retroceso costero mediante teledetección satelital multitemporal

Mgrt. Francisco J. Rubilar Rocha  
**Unidad de Medioambiente**  
Dirección de Desarrollo Productivo  
Municipalidad de Saavedra  
Versión 1 – 11.08.2026

## 1. Introducción y contexto

La comuna de Saavedra presenta tres fenómenos costeros de alta relevancia: (i) el retroceso costero acelerado en la barra sur frente a Playa Maule, (ii) el desplazamiento de la desembocadura del Río Imperial norte-sur y (iii) la apertura mecánica del Lago Budi en el sector “Boca Budi”. Esta configuración condiciona el transporte de sedimento y, por tanto, el comportamiento erosivo de cada tramo. Estos eventos no se han estudiado con precisión a nivel local y para la proyección de obras públicas de mitigación de riesgo del desastre, se requieren indicadores concretos y generados con herramientas científicamente válidas. El siguiente reporte muestra los procedimientos matemáticos y geoespaciales para obtener la **tasa de retroceso costero** y determinar la distancia total de **playa perdida** en el tramo costero que entre la desembocadura del Río Imperial y Cerro Maule.

## 2. Gestión climática comunal

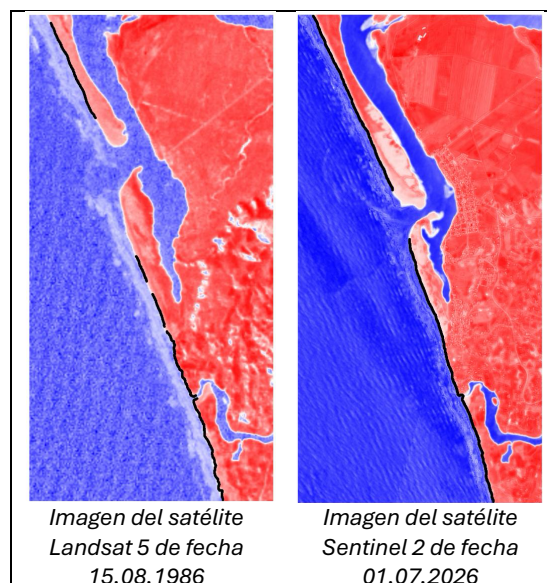
El PACCC reconoce la erosión del borde costero como riesgo comunal en su evaluación de riesgo (sección 4.5), sin embargo, las cadenas de impacto asociadas al borde costero no fueron cuantificadas, por no contar con información local de base. El presente reporte constituye la primera cuantificación de dicho riesgo, con resolución espacial de 50 m y serie temporal de cuatro décadas. La **Medida de Adaptación N°17** contempla entre sus acciones la ejecución de obras de drenaje y defensas costeras, y establece como indicador de progreso el número de defensas costeras construidas en sectores de riesgo. Su alcance territorial comprende Puerto Saavedra y las zonas de riesgo identificadas, categoría en la que Playa Maule queda incorporada a partir de los resultados aquí presentados. La **Medida de Mitigación N°11** incorpora la

estabilización de suelos afectados por erosión y considera la reducción de la erosión como indicador de seguimiento, lo que permite plantear una estrategia mixta que combine protección estructural con restauración de cobertura vegetal en el sector.

## 3. Materiales y métodos

### 3.1. Obtención de imágenes satelitales

El levantamiento aplica el protocolo de extracción automatizada de líneas de costa mediante clasificación supervisada de imágenes satelitales con corrección subpíxel, complementado con análisis de cambio por transectos según el estándar del *Digital Shoreline Analysis System (DSAS)*, cubriendo cuatro décadas (1986–2026). La Figura 1, muestra un ejemplo del procesamiento por banda de imágenes de 1986 y 2026, donde se pueden observar los cambios costeros del área estudiada. La Tabla 1 muestra el origen de los datos. El total de imágenes procesadas fue de 2.899 de nivel Tier 1 (calidad apta para análisis de series temporales). Se descartaron 319 imágenes de Tier 2 por no cumplir estándares de georreferenciación. Ambos métodos cuentan con validación en literatura internacional y aplicaciones previas documentadas en el litoral chileno.



**Figura 1.** Imágenes satelitales procesadas en las bandas B3, B5 y B11 del espectro electromagnético para discriminar el suelo del agua en la costa de la comuna de Saavedra.



**Reporte ejecutivo**  
Análisis del retroceso costero  
mediante teledetección satelital  
multitemporal

Mgrt. Francisco J. Rubilar Rocha  
**Unidad de Medioambiente**  
Dirección de Desarrollo Productivo  
Municipalidad de Saavedra  
Versión 1 – 11.08.2026

**Tabla 1.** Fuentes de datos satelitales para la extracción temporal de la línea costera en la comuna de Saavedra.

| Misión          | Período   | Res. | Observaciones                                          |
|-----------------|-----------|------|--------------------------------------------------------|
| Landsat 5 TM    | 1986–2011 | 30 m | 266 imágenes; cobertura discontinua en Sudamérica      |
| Landsat 7 ETM+  | 1999–2021 | 30 m | 788 imágenes; presenta defecto SLC-off desde 2003      |
| Landsat 8 OLI   | 2013–2026 | 30 m | 503 imágenes                                           |
| Landsat 9 OLI-2 | 2021–2026 | 30 m | 170 imágenes                                           |
| Sentine l-2 MSI | 2015–2026 | 10 m | 1.172 imágenes; nivel L2A (reflectancia de superficie) |

3.2. Extracción de línea de costa

El procesamiento se ejecutó mediante la plataforma Google Earth Engine para la recuperación y mosaicado de escenas, y procesamiento local para la detección (Gorelick et al., 2017). El algoritmo aplica los siguientes pasos por cada imagen: (i) Enmascaramiento de nubes y sombras mediante la capa de clasificación de escena (SCL) y umbral probabilístico; (ii) clasificación supervisada de píxeles en cuatro categorías: arena, agua, espuma de rompiente y otros; (iii) delineación de la interfaz agua-tierra mediante *umbralización de Otsu* sobre el índice espectral, con interpolación subpíxel que permite precisión superior al tamaño nominal de celda; (iv) validación contra una línea de costa de referencia digitalizada, descartando detecciones que exceden una distancia máxima predefinida; (v) filtrado automático de duplicados temporales y de imágenes con georreferenciación deficiente (Vos et al., 2019a). De las 2.899 imágenes procesadas se obtuvieron 1.457 líneas de costa válidas. El proceso descartó 352 duplicados por solape de teselas y 13 escenas por error de georreferenciación superior al umbral establecido.

3.3. Diseño de la red de transectos.

La medición del cambio se realiza sobre transectos perpendiculares a la costa, generados a partir de líneas base trazadas por el lado continental. El diseño incorporó tres decisiones metodológicas relevantes: (i) *la segmentación por unidades geomorfológicas*, donde se trazaron tres líneas base independientes en lugar de una continua, excluyendo deliberadamente las dos desembocaduras. Ello, debido a que estos sectores presentan dinámica estuarina —migración del canal, apertura y cierre de la boca— cuyo comportamiento no corresponde a erosión costera oceánica y contaminaría el análisis; (ii) *la densidad y longitud de los transectos*, que fue de 127 a intervalo regular de 50 metros, con longitud de 600 metros. Esta longitud se determinó tras verificar que una configuración inicial más corta truncaba las mediciones en el sector de mayor variación histórica; y (iii) *la verificación geométrica*, para lo cual se validó mediante inspección de coordenadas que el vértice de origen de cada transecto se localice en el continente, condición necesaria para la correcta asignación del signo (sentido espacial) de las tasas.



**Figura 2.** Representación espacial de la distribución y longitud de los transectos a lo largo de la costa de la comuna de Saavedra.



**Reporte ejecutivo**  
Análisis del retroceso costero  
mediante teledetección satelital  
multitemporal

Mgrt. Francisco J. Rubilar Rocha  
**Unidad de Medioambiente**  
Dirección de Desarrollo Productivo  
Municipalidad de Saavedra  
Versión 1 – 11.08.2026

3.4. *Cálculo de tasas y control de calidad.*

Para cada transecto se calculó la tasa de cambio mediante regresión lineal de la posición de la costa respecto del tiempo, estadístico equivalente al Linear Regression Rate (LRR) del sistema DSAS. Se aplicó filtrado de valores atípicos por transecto antes del ajuste. Se reporta adicionalmente el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) como indicador de consistencia de la tendencia. El estudio incorporó un protocolo de validación que verificó la robustez del resultado frente a tres fuentes potenciales de error, que se describen en la Tabla 2 (Vos et al., 2019b).

**Tabla 2.** Errores verificados durante el proceso de análisis y su respectivo control de calidad.

| Fuente de error evaluada    | Método de verificación                                                   | Resultado del control de calidad                                  |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Consistencia entre misiones | Cálculo independiente de la tendencia con cada satélite                  | Coincidencia en dirección y magnitud (L7, L8 y S2, $p < 0,0001$ ) |
| Cobertura de transectos     | Verificación del porcentaje de mediciones dentro del rango del transecto | 0,0% fuera de rango tras el ajuste de longitud                    |
| Vacío temporal 1988–1997    | Recálculo de tasas excluyendo el período previo al vacío                 | Variación de 0,06 m/año en el sector crítico; tendencia robusta   |

3.5. *Extrapolación lineal de la línea de costa.*

La proyección extrapola la tasa de cambio de cada transecto, calculada por regresión lineal sobre el período observado (1986–2026), hacia los años 2036 y 2046. El procedimiento es análogo al estadístico Linear Regression Rate (LRR) del sistema Digital Shoreline Analysis System (Himmelstoss et al., 2018), extendido más allá del rango de datos observados. La proyección no incorpora una posible aceleración del

retroceso asociada al ascenso del nivel del mar, ni cambios en el aporte sedimentario de las desembocaduras adyacentes, ni el efecto de eventos extremos puntuales que puedan producir retrocesos no capturados por la tendencia media.

4. **Resultados**

4.1. *Tasas de cambio*

La Tabla 3 muestra los descriptores estadísticos básicos de las tasas de cambio de la línea costera en la comuna de Saavedra, en donde se destaca la media de retroceso de la línea costera en Playa Maule, con una tasa de retroceso de -4.36 (m/año), acumulando una pérdida de la playa aproximada de 174 metros en los últimos 40 años.

**Tabla 3.** Tasas de cambio de la línea costera de la comuna de Saavedra.

| Parámetro            | Barra Norte | Playa Maule | Sur de Boca Budi |
|----------------------|-------------|-------------|------------------|
| N° transectos        | 53          | 54          | 20               |
| Media                | -0,02       | -4,36       | -2,14            |
| R <sup>2</sup> medio | 0,00        | 0,81        | 0,53             |
| Mínimo               | -0,39       | -5,90       | -3,05            |
| Máximo               | +0,22       | -1,35       | -1,37            |

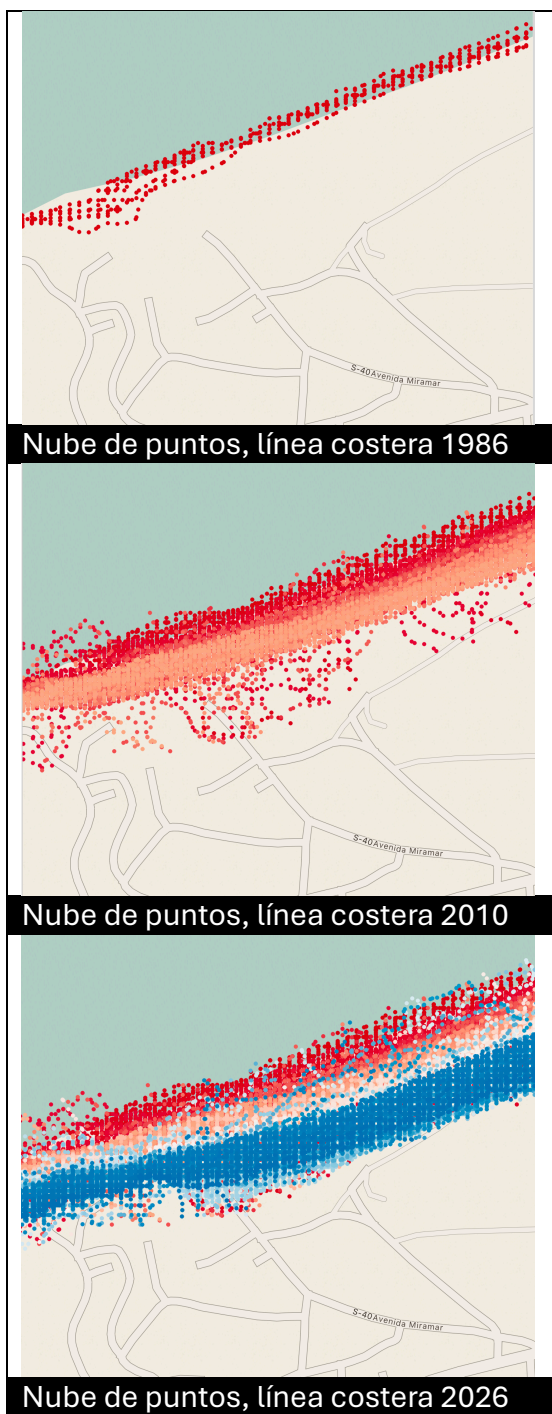
La erosión no se distribuye de manera uniforme. El sector norte no presenta tendencia neta, con un  $R^2$  medio de 0,00 que indica variabilidad sin dirección definida. La interpretación de esto es que la costa oscila interanualmente, pero retorna a posiciones equivalentes. En contraste, el sector de Playa Maule presenta un  $R^2$  medio de 0,81 indicando un desplazamiento sistemático y sostenido en el tiempo. Próximos a la desembocadura del Río Imperial, los ocho transectos de mayor retroceso son consecutivos y registran tasas entre -5,3 y -5,9 m/año, con coeficientes de determinación entre 0,70 y 0,88. Se puede atribuir este incremento, al avance norte-sur de la desembocadura, fenómeno que se estudiará en otro reporte dedicado.





**Reporte ejecutivo**  
Análisis del retroceso costero  
mediante teledetección satelital  
multitemporal

Mgrt. Francisco J. Rubilar Rocha  
**Unidad de Medioambiente**  
Dirección de Desarrollo Productivo  
Municipalidad de Saavedra  
Versión 1 – 11.08.2026



**Figura 3.** Nubes de puntos de la línea costera del sector de Playa Maule, comuna de Saavedra, en diferentes periodos de tiempo.

La Figura 3 muestra los resultados de la extracción de las líneas costeras en los años 1986, 2010 y 2026, periodos que permiten evidenciar el avance del mar sobre Playa Maule. En el apéndice de cartografías y gráficas se detallan con mayor escala y sectorizados, los resultados obtenidos para todos los transectos analizados en el borde costero de la comuna de Saavedra.

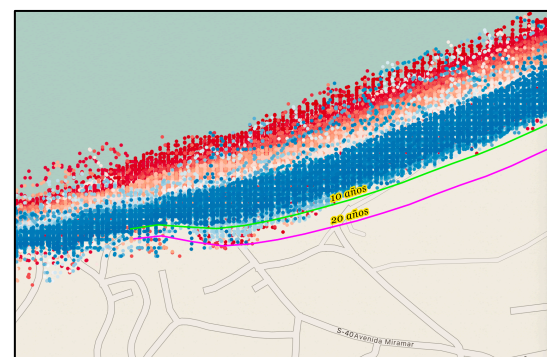
**4.2. Proyección de la línea de costa a 10 y 20 años**

La Tabla 4 muestra los resultados de la extrapolación lineal de la tendencia histórica del retroceso de la línea costera. El sector de Playa Maule presenta el mayor retroceso proyectado y, simultáneamente, el intervalo de confianza más estrecho en términos relativos. La elevada correlación de la tendencia histórica ( $R^2 = 0,81$ ) determina una pendiente de regresión bien determinada, y por tanto una proyección con menor incertidumbre estadística.

**Tabla 4.** Proyección por extrapolación lineal de la tendencia histórica del retroceso de la línea costera de la comuna de Saavedra.

| Parámetro            | Barra Norte   | Playa Maule     | Sur de Boca Budi |
|----------------------|---------------|-----------------|------------------|
| 10 años              | -0,2 m        | -43,6 m         | -21,4 m          |
| 20 años              | -0,3 m        | -87,1 m         | -42,8 m          |
| Rango a 20 años      | -1,6 a +1,3 m | -90,0 a -84,3 m | -45,4 a -40,2 m  |
| R <sup>2</sup> medio | 0,00          | 0,81            | 0,53             |

La Figura 4 muestra superpuestas las líneas de costa proyectadas a 10 y 20 años, en el escenario de extrapolación directa que se observa en la Tabla 4. El escenario desfavorable, que considera el límite superior de retroceso, establece una pérdida de la playa de 62 y 123,9 metros, en un horizonte de 10 y 20 años respectivamente.



**Figura 4.** Líneas de costa proyectadas mediante extrapolación lineal de la tendencia histórica en el sector de Playa Maule en la comuna de Saavedra.





## Reporte ejecutivo

### Análisis del retroceso costero mediante teledetección satelital multitemporal

Mgrt. Francisco J. Rubilar Rocha  
**Unidad de Medioambiente**  
Dirección de Desarrollo Productivo  
Municipalidad de Saavedra  
Versión 1 – 11.08.2026

#### 4.3. Generación de instrumento de gestión ambiental.

Se dispone por primera vez de una línea base cuantitativa, georreferenciada y replicable del cambio costero comunal, con resolución espacial de 50 metros a lo largo de todo el litoral analizado, que, a su vez, es reproducible con datos de acceso abierto, lo que permite su actualización periódica sin dependencia de consultoría externa. La metodología quedó sistematizada en un protocolo operativo que incluye controles de calidad y catálogo de errores documentados.

### 5. Conclusiones

El litoral de Saavedra presenta erosión costera activa y sostenida, y en particular, el sector de Playa Maule, frente al área poblada de Puerto Saavedra, se concentra el retroceso más severo, con una **tasa media de 4,36 m/año y una pérdida acumulada estimada del orden de 174 metros en cuatro décadas**. Los resultados son coherentes con el patrón regional documentado para el litoral arenoso de Chile y con la percepción territorial de pérdida de playa. Bajo el escenario desfavorable a 20 años, el sector de Playa Maule podría alcanzar un retroceso de hasta 90,0 metros respecto de la posición actual, con un transecto individual de peor comportamiento proyectado en 123,9 metros. El sector sur de Boca Budi podría alcanzar hasta 45,4 metros en el mismo horizonte.

### 6. Recomendaciones

Debido a que la tasa de retroceso de Playa Maule podría constituir un riesgo para la población e infraestructura humana se recomienda:

- (i) Evaluar la factibilidad técnica y económica de una obra de protección costera en el subsector de mayor retroceso de Playa Maule en el marco de la

Medida N°17 del PACCC. El diseño debe considerar la evaluación de transferencia de erosión hacia sectores adyacentes y la complementariedad con medidas de estabilización basadas en vegetación conforme a la Medida N°11.

- (ii) Incorporar los resultados como antecedente técnico en los instrumentos de planificación territorial comunal.
- (iii) Complementar con estudios que consideren el ascenso del nivel del mar y el aporte sedimentario de la desembocadura del Río Imperial.
- (iv) Evaluar la exposición de infraestructura y viviendas en el sector de Playa Maule considerando la proyección de las tasas medidas.
- (v) Establecer monitoreo periódico con actualización anual de la serie.
- (vi) Utilizar la línea base como sustento técnico en la formulación de iniciativas de inversión ante el Gobierno Regional y programas para la Gestión del Riesgo del Desastre.
- (vii) Evaluar la reclasificación temporal de la Medida N°17 del PACCC desde mediano plazo (2031–2035) a corto plazo para el sector de Playa Maule, Aplicando la tasa media medida, el retroceso acumulado alcanzaría del orden de 22 metros antes del inicio actualmente programado de la medida (2031) y de 39 metros antes de su término (2035), superficie de playa que se perdería de forma irrecuperable durante el período de espera.
- (viii) Considerar, en la etapa de diseño, la existencia de una solicitud de ECMPO en tramitación sobre el sector de Playa Maule (2.138 ha).



**Reporte ejecutivo**  
Análisis del retroceso costero  
mediante teledetección satelital  
multitemporal

Mgrt. Francisco J. Rubilar Rocha  
**Unidad de Medioambiente**  
Dirección de Desarrollo Productivo  
Municipalidad de Saavedra  
Versión 1 – 11.08.2026

**7. Bibliografía**

[1] European Space Agency. Sentinel-2 User Handbook.  
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>

[2] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

[3] Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2018). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide. U.S. Geological Survey Open-File Report 2018-1179, 110 p.  
<https://doi.org/10.3133/ofr20181179>

[4] U.S. Geological Survey. Landsat Collection 2 Level-2 Science Products.  
<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>

[5] Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. Environmental Modelling & Software, 122, 104528.  
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>

[6] Vos, K., Harley, M. D., Splinter, K. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). Sub-annual to multi-decadal shoreline variability from publicly available satellite imagery. Coastal Engineering, 150, 160–174.  
<https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.04.004>

**8. Declaración de uso de IA**

Para la optimización de scripts Python en Google Earth Engine (preprocesamiento de bandas espectrales, cálculo de transectos DSAS, filtrado de outliers), se utilizó asistencia de Claude Code IA (Anthropic Inc.). Todos los outputs fueron validados manualmente contra lineamientos de USGS y verificados con tests de consistencia inter-satélite.

Francisco J. Rubilar Rocha  
**Magíster en Manejo de Recursos Naturales**  
Ingeniero Civil Ambiental  
Diplomado en Sensores Remotos Aplicados al Sector Silvoagropecuario y Medioambiente.  
Diplomado en Análisis de Ciclo de Vida  
Diplomado en Gestión de la Calidad del Aire