



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO
DE CHILE



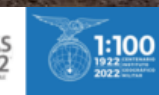
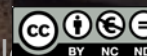
Toward a kinematic reference frame for mining in Chile

Transition from PSAD56/SAD69 to SIRGAS.

José Antonio Tarrío Mosquera^{1x}, Jesarella Inzunza Muñoz¹, Catalina Caceres Venegas¹, Marcelo Caverlotti Silva¹, Valeria Vásquez Tejo¹, Fernando Isla Rodríguez¹, Gabriel Jeldres², Rodrigo Urrutia², Cristian Mardones²

¹Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico USC
Universidad de Santiago de Chile

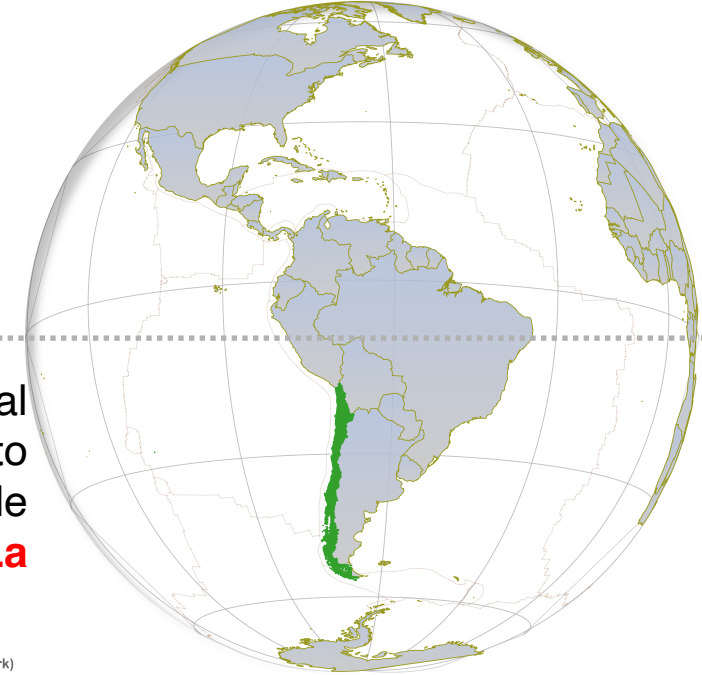
²Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile



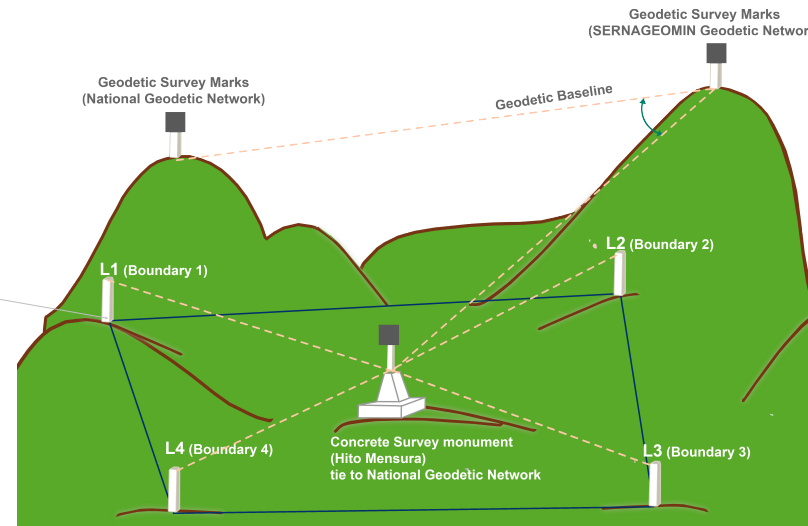
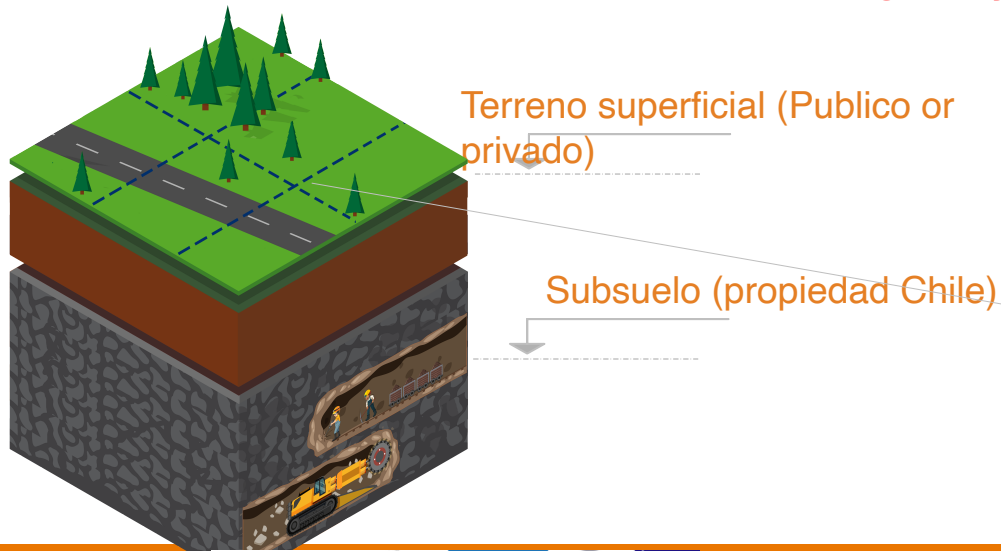


1. Minería en Chile
 1. Contexto
 2. La problemática
 3. Proyecto “cambio de datum”: Transición de PSAD56-SAD69 a SIRGAS (REDGEOMIN). LEY 21420.
2. Transición de MR clásico a MR moderno, de estático a cinemático
 1. Redes Geodésicas: Primaria(activa) y Secundaria(pasiva)
 2. Modelo de Deformación: ADELA (Analysis deformation beyond the Andes 2009-2022)
 3. Parámetros de Transformación
3. Próximos pasos. Implementación

La Constitución de 1980 (artículo 19 numeral 24 inciso 6) establece que "el Estado tiene el dominio absoluto, exclusivo, inalienable e imprescriptible de todas las minas...". Sin embargo, indica la posibilidad de concesiones de terrenos para explorar y extraer minerales. Este procedimiento se lleva a cabo a través de los tribunales ordinarios de justicia y no a través de una agencia con competencia técnica.

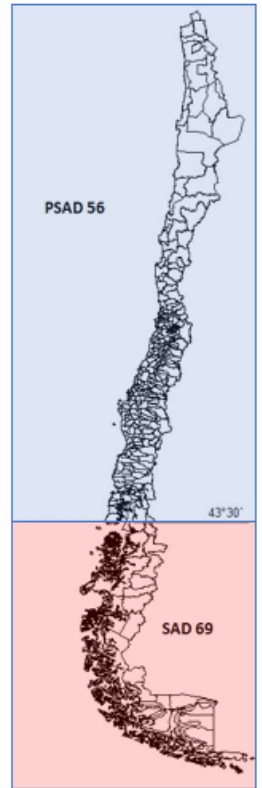
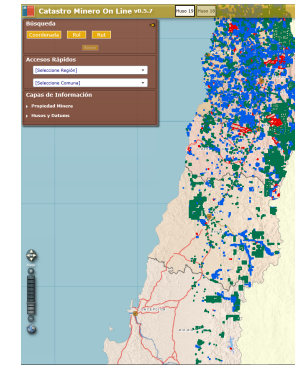
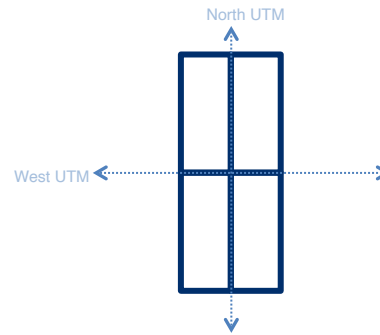
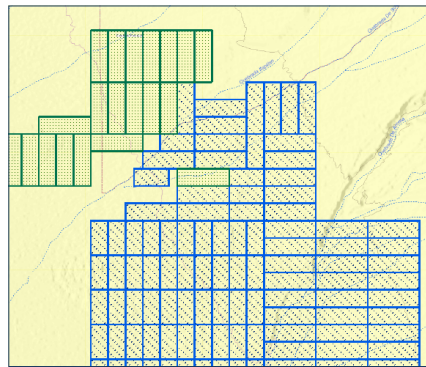
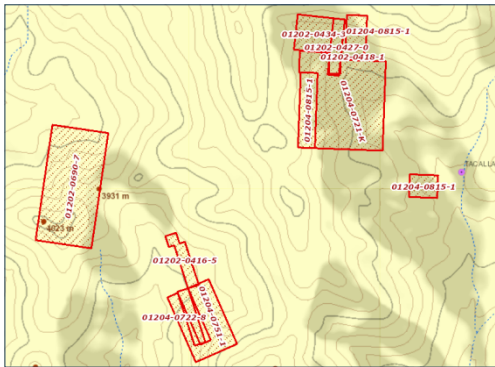
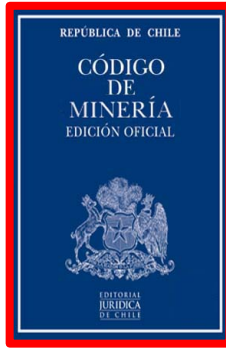


Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), in English, National Service of Geology and Mining of Chile. **Mission:** Asistencia a los Tribunales en el otorgamiento de concesiones de explotación y solicitudes de sentencia constitutiva de concesiones de exploración minera. También mantener actualizado el **catastro de concesiones mineras**. **La forma actual de las concesiones es rectangular y orientada según la cuadrícula UTM.**



Minería en Chile. Contexto

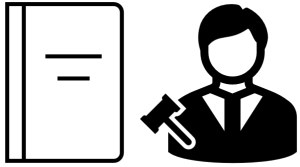
El Código de Minería de 1874, 1888, 1930 y 1932 funcionaba en coordenadas arbitrarias, con orientaciones magnéticas o astronómicas, lo que generaba incertidumbre en cuanto a la ubicación de las concesiones, incluso originando superposiciones muy difíciles de detectar en el tiempo.



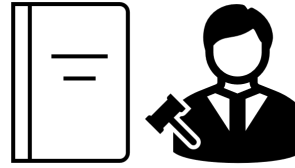
La inclusión de las **proyección UTM** en el **MC de 1983** resolvió parcialmente el problema. Sin embargo, para dar una solución definitiva, las concesiones constituidas bajo la legislación anterior también debían determinarse en estas coordenadas UTM.

Como resultado de lo anterior, El Catastro Nacional de Concesiones Mineras se genera en el sistema de referencia **PSAD56 Provisional South American Datum 1956 (north to -43°30)** or **SAD69 South American Datum 1969 (-43°30 to south)** según la ubicación de la concesión.

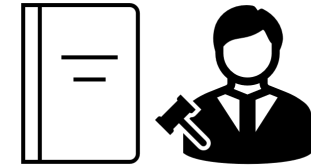
Minería en Chile. Contexto



Código Minería 1932



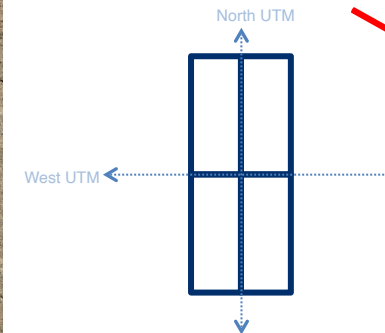
- Código Minería 1983
- Código Minería REGULATIONS 1983

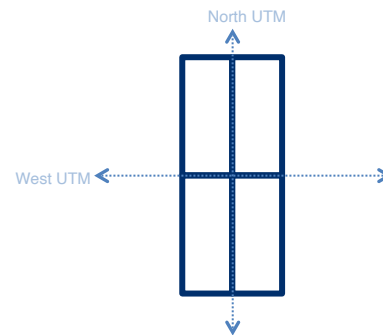
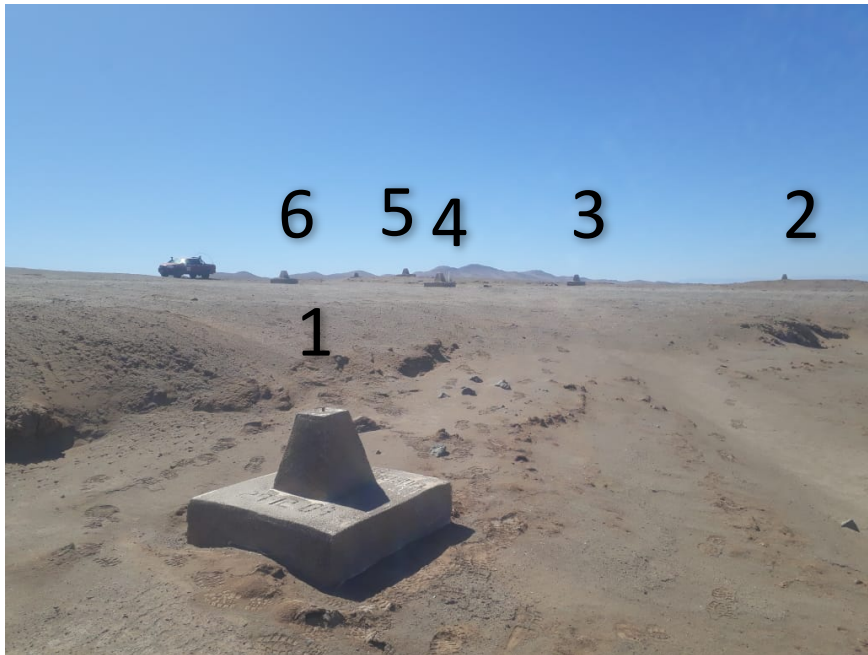
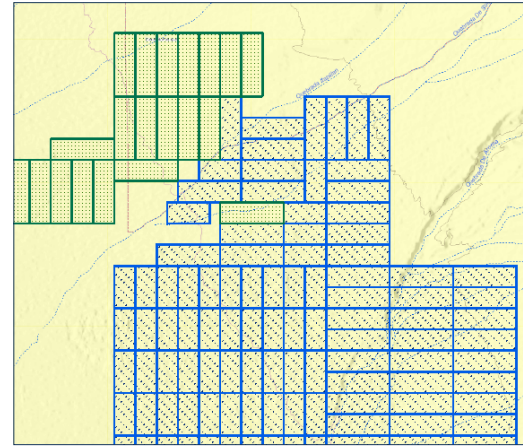
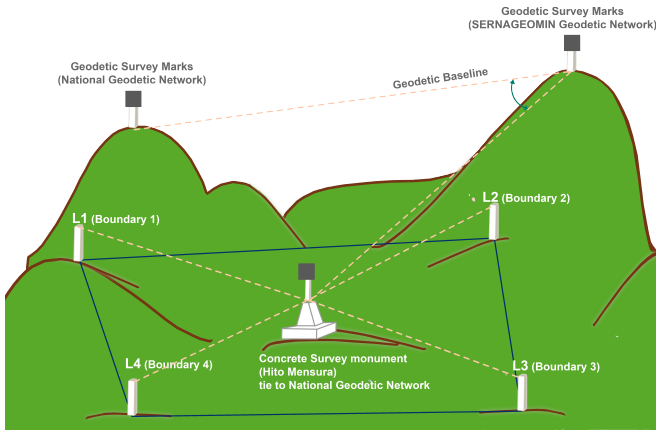


- LAW 21420
- REGULATIONS 2023...ON GOING

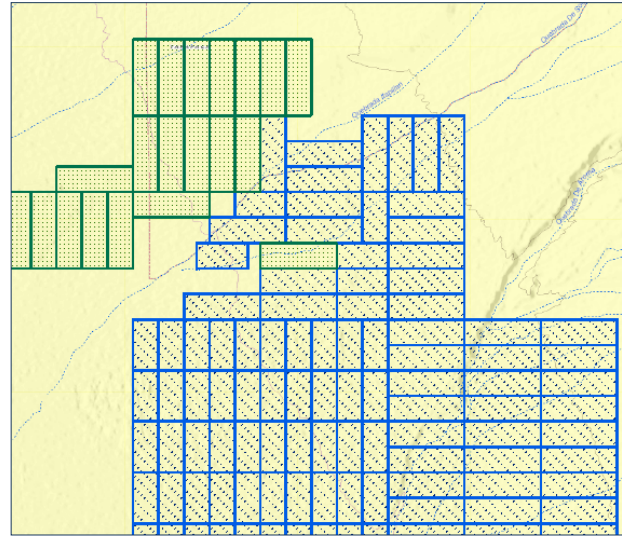
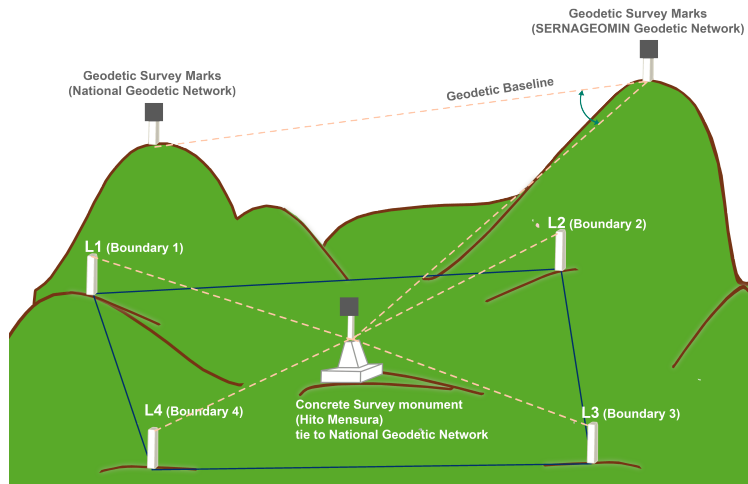
La primera ley en Chile que incluye SIRGAS como MR

REGULATIONS	Código Minería 1932	Código Minería 1983	LAW 21420(2022)
Reference Frame	Topocentric coordinates	PSAD56-SAD69	SIRGAS-REDGEOMIN
Coordinates System	Eje de abscisa según meridiano astronómico o norte magnético (más declinación)	UTM projection	UTM projection
Monumentation	Benchmark(Hito Referencia) +truncated pyramid (40cmx20cmx80cm)	Benchmark(Hito mensura)+Boundary(lindero)	CORS and digital cadastre
Status	Derogada	Vigente, En transición	on going





Teoría:
donde el RF clásico no está deformado, un único lindero define una intersección de dos concesiones



Realidad:
La deformación de la red PSAD56/SAD69 no garantiza homogeneidad del MR para la generación de las concesiones



1. Las mediciones geodésicas de PSAD56 y SAD69 fueron realizadas en los años 50 a 70 por el IGM (Instituto Geográfico Militar) e IAGS (Inter-American Geodetic Survey) de los Estados Unidos, es decir son antiguas.
1. En Chile, los parámetros de transformación oficiales entre MR clásico y MR moderno, como SIRGAS, están disponibles solo para cartografía, escala 1:25000. La precisión es diferentes según la fuente, ± 17 m (EPSG p. ej 6971) o en otra ± 5 m (EPGS p. ej 10135), siendo los mismos parámetros.

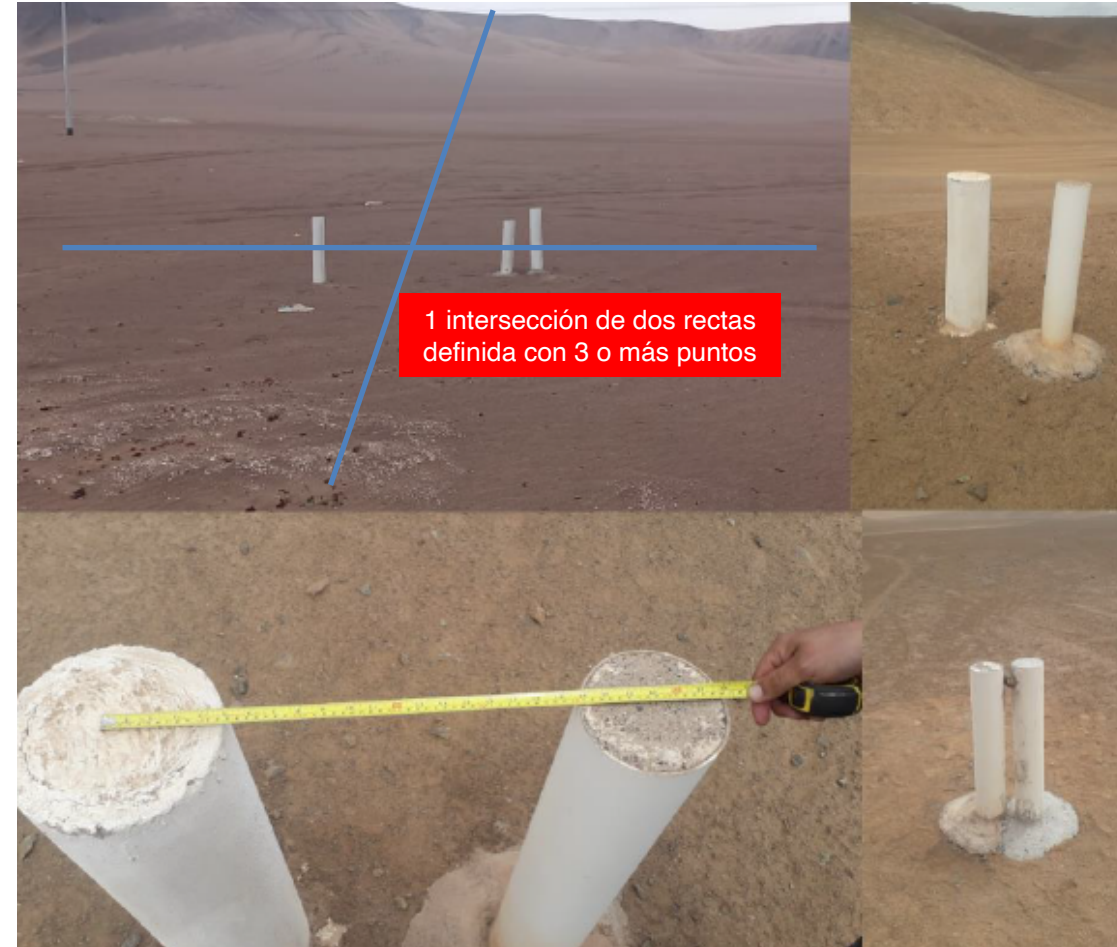
Desde las observaciones del año 1970 en Chile, varios terremotos han deteriorado los MR clásicos a nivel métrico.

Actualmente, PSAD56 y SAD69 son marcos de referencia clásicos sin mantenimiento.

PSAD56 y SAD69 no consideran la deformación de la corteza de Chile.

El MR actual para Chile (SIRGASChile) es una densificación SIRGAS en la época de observación (2002.00, 2010.00, 2013.00, 2016.00, 2021.00).

parám



Debido a lo anterior, hemos encontrado en campo algunas intersecciones de dos concesiones que no se materializa con un punto sino con varios

Alternativas planteadas:

1. *“Continuar en sistemas clásicos (PSAD56/SAD69)”*
2. *“Realizar transformaciones por Regiones (división político administrativa) en Chile.”*
3. *“Realizar una medición directa de la red de todos los vértices geodésicos y HM”, es decir aprox 95000 vértices.*

Alternativas planteadas al Ministerio de Minería:

Alternativa 1:

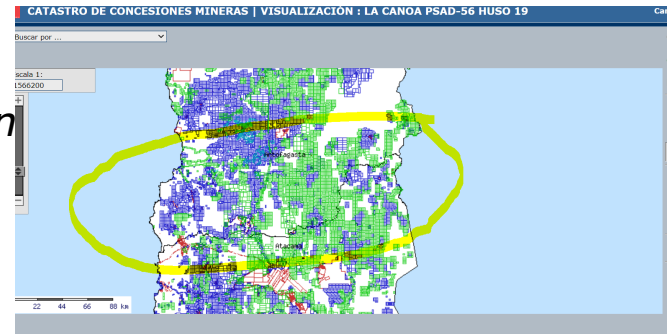
Realizar observaciones con GNSS en sistemas clásicos sin transformaciones precisas genera incertidumbre en la definición de las concesiones debido al MR.

Alternativa 2:

Dividir en partes el país genera superposición en las zonas

Alternativa 3:

1. *Medir todo de nuevo no corrige la deformación de la red clásica*
2. *¿Qué linderos o HM se medirían en terreno?*
3. *¿Se mide con equipamiento clásico? Si se mide con GNSS ¿Qué parámetros se usan?*





Minería Chilena. Proyecto cambio de datum



Año 2017



Año 2018

Año 2019

Año 2019

Año 2019

Año 2019-2022



USACH Documento SNIT

SNIT GT Geodesia

SNIT SGR SIRGAS

SRGM Licitación Pública

USACH Adjudicación

SRGM-USACH
REDGEOMIN19@2019.0
0REDGEOMIN20@2020.00
REDGEOMIN21@2021.00
REDGEOMIN22@2022.00

SIRGAS 18 Pres MEXICO

1. Reunión IGM-Dpto Geodesia
2. Reunión MBN-Departamento de Mensura
3. Reunión MINREL-DIFROL

DIFROL y MBN facilitan información de los sistemas clásicos para el estudio

REDGEOMIN

Dynamic Geocentric CRS Details [VALID]	
NAME:	REDGEOMIN
CODE:	9694
CRS TYPE:	Dynamic Geocentric
USAGE:	
Usage Details	
SCOPE:	Geodesy, cadaastre, engineering survey, topographic mapping.
EXTENT:	Chile
DATUM:	Red Geodesica Para Minería en Chile
COORDINATE SYSTEM:	Cartesian 3D CS (geocentric), Axes: geocentric X Y Z. Orientations: X and Y in equatorial plane, X positive thru positive towards North Pole. UoM: m
META DATA	
INFORMATION SOURCE:	National Service of Geology and Mining (SERNAGEOMIN), "Estudio de Prefactibilidad de Datum Geodesico de
DATA SOURCE:	EPSG
REVISION DATE:	5 de febrero de 2021
CHANGE ID:	[2020.135]

EPSG CODE:9694



OBJETIVO:

- Implementar un MR moderno para la minería de Chile, idealmente cinematográfico.
- Calcular parámetros de transformación únicos para todo el país para transformar de PSAD56/SAD69 a un MR moderno para el catastro de minería en Chile. **Los parámetros deben mantener la forma, tamaño y orientación de la concesión minera en el catastro digital y deben ser únicos para todo Chile sin dividir el país.**

FASE 1:

Red Geodésica Primaria (Activa): Observación, cálculo y ajuste de una red geodésica que cubra todo el país, compuesta exclusivamente con CORS de acceso abierto. El procesamiento será con los estándares IGS y SIRGAS, y el nombre de la red es REDGEOMIN (Red Geodésica para Minería EPSG: 9694). La red se complementa con **un modelo de deformación denominado ADELA: (Análisis de DEformación más allá de Los Andes, 2009-2022)**

FASE 2:

Red Geodésica Secundaria (Pasiva): Se obtienen nuevas coordenadas vinculadas a REDGEOMIN, midiendo con GNSS sobre los puntos de referencia de la red primaria PSAD56-SAD69. Lo anterior permite obtener parejas de coordenadas en ambos sistemas para el siguiente paso.

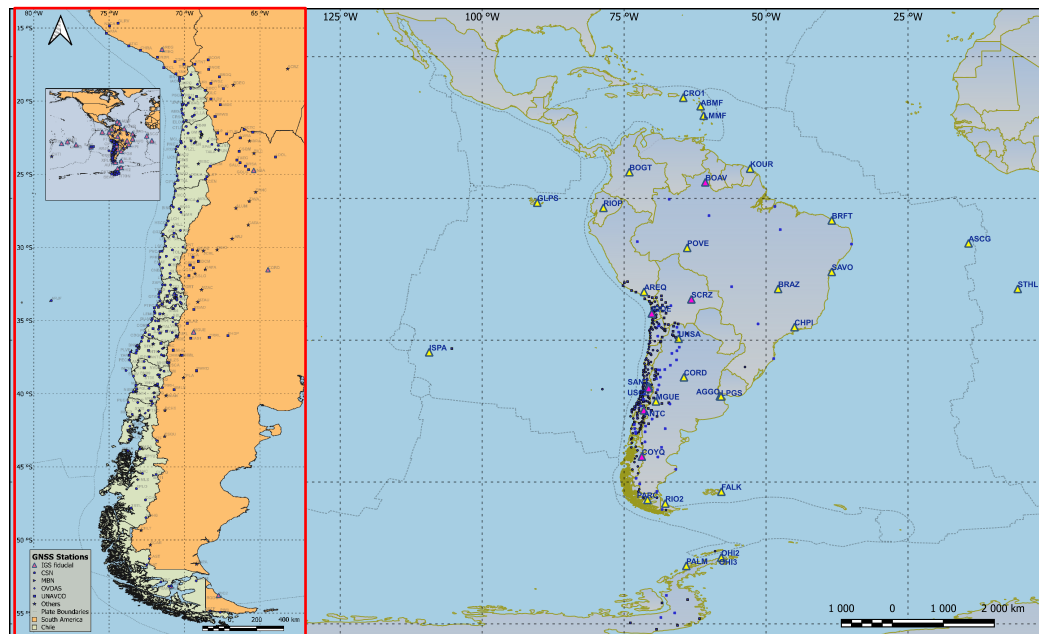
FASE 3:

Parámetros de transformación: Calcular los parámetros de transformación con el menor RMS en todo Chile, que no modifiquen la forma, orientación y tamaño de la concesión.

FASE 4:

Puesta en marcha de REDGEOMIN y parámetros para implementar la transición de PSAD56-SAD69 a REDGEOMIN. Inicio de la LEY 21420





Red geodésica primaria (activa): REDGEOMIN (Red Geodésica para Minería), in English Geodetic Network for Mining

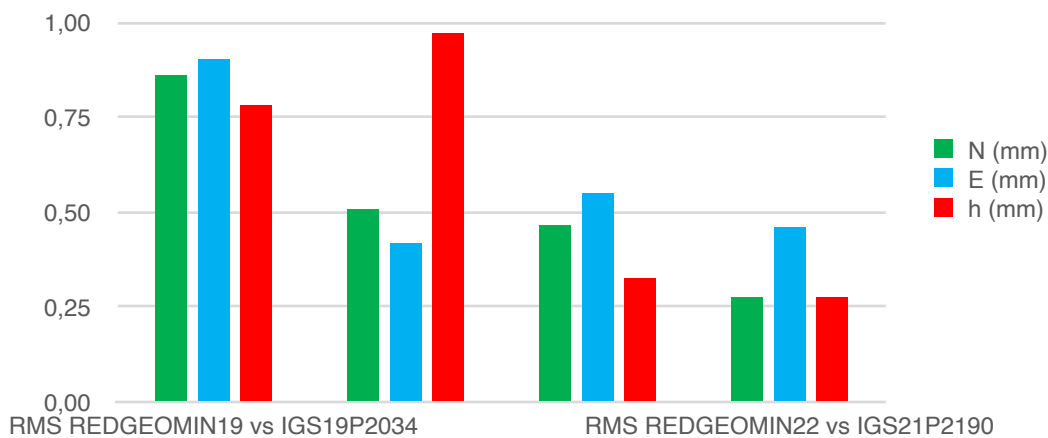
- Datos de 390 CORS en Chile y 30 alrededor de Chile
- Procesamiento con estándares IGS y SIRGAS:
7 soluciones diarias combinadas en 1 solución semanal: coordenadas alineadas con el sistema de referencia IGS (soluciones mínimas restringidas)

Las primeras cuatro soluciones se

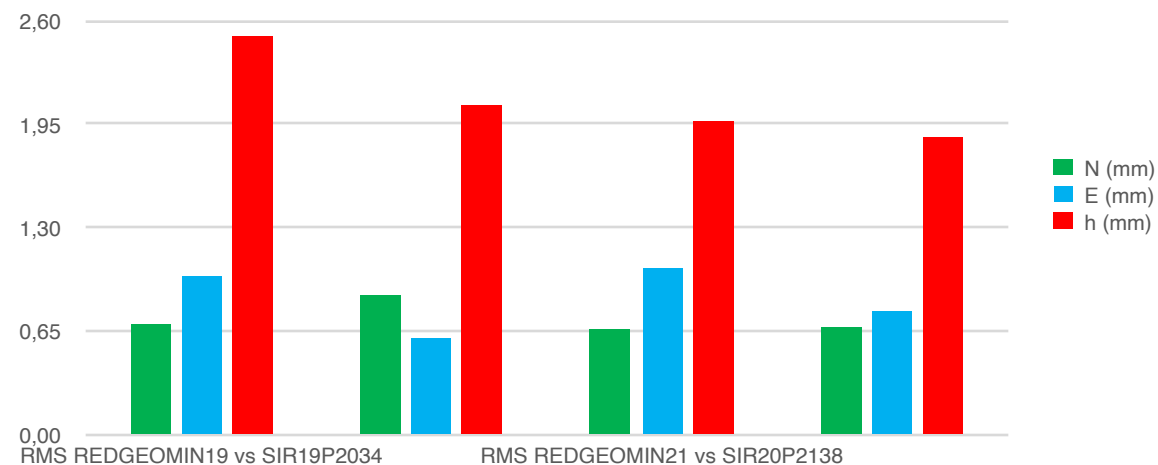
- REDGEOMIN@2019.00
- REDGEOMIN@2020.00
- REDGEOMIN@2021.00
- REDGEOMIN@2022.00

Weekly station position repeatability			
	E (mm)	N (mm)	h (mm)
2019.00	1.59	1.60	3.64
2020.00	1.89	2.27	4.90
2021.00	2.23	2.21	5.26
2022.00	2.01	1.89	5.05

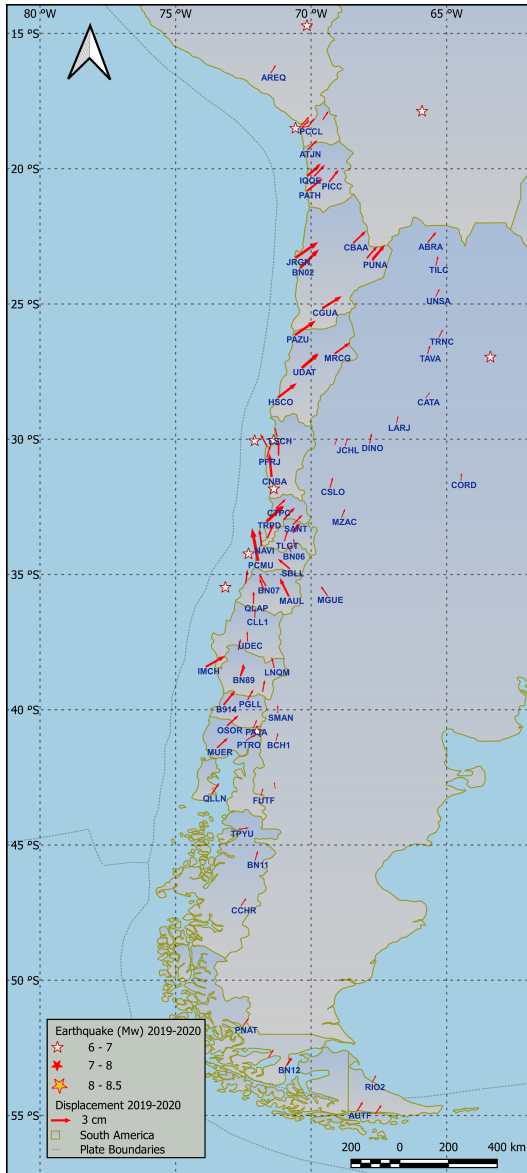
REDGEOMIN-IGS alignment



REDGEOMIN-SIRGAS alignment



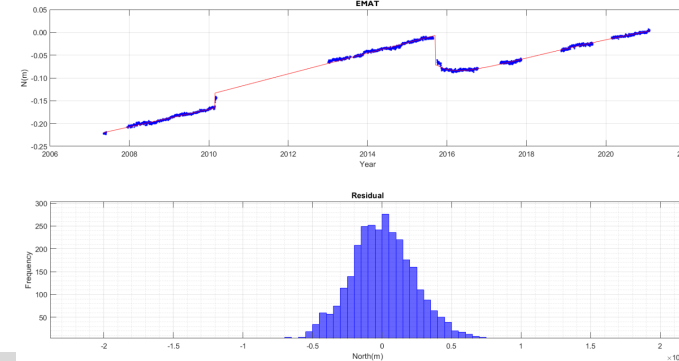
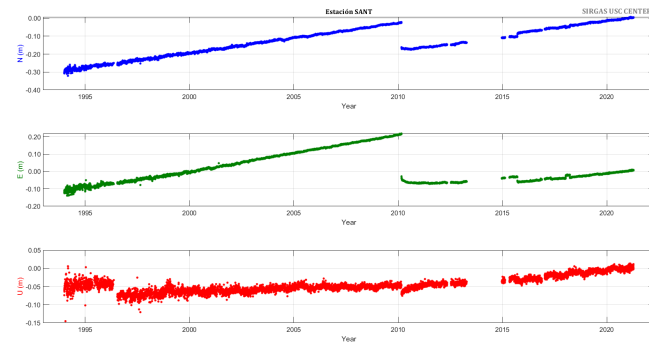
Transición de MR clásico a MR moderno. Modelo de deformación



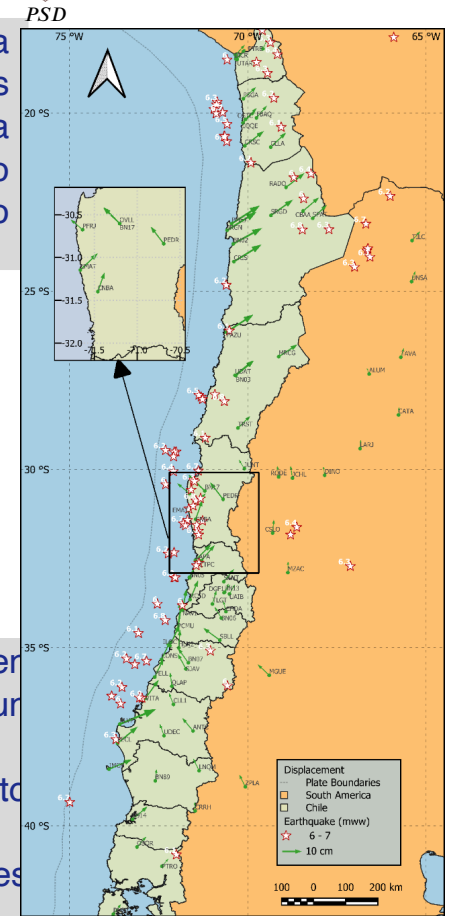
Realizamos un procesamiento GNSS semanal con datos de estaciones GNSS de datos abiertos, en el período 2022 a 2009, en el proyecto denominado ADELA: (Análisis de DEformación más allá de Los Andes). El modelo funcional de la serie temporal para ADELA es el siguiente:

$$f(t) = x(t_0) + \underbrace{\sum_{i=1}^{n_p+1} p_i(t-t_r)^{i-1}}_{\text{Linear velocity}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t-t_j)}_{\text{discontinuities}} + \underbrace{\sum_{k=1}^{n_F} \left[p_{a,k} \cos(\omega_k(t-t_0)) + p_{b,k} \sin(\omega_k(t-t_0)) \right]}_{\text{periodic}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n^{\log}} a_i \log \left[1 + \frac{\Delta t}{T_i} \right]}_{\text{PSD}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n^{\exp}} b_i \left[1 - e \left(-\frac{\Delta t}{T_i} \right) \right]}_{\text{PSD}}$$

La serie temporal GNSS fue un aspecto altamente complejo de este estudio, ya que debido a la particularidad de Chile, el movimiento de la estación no puede ser reconstruido con series temporales lineales [Sánchez et. al 2020]. Para ello, se necesita un modelo conjunto que tenga en cuenta los períodos intersísmico, cosísmico y postsísmico. Modelamos un modelo postsísmico con deformación postsísmica (PSD) que describe el período posterior al terremoto combinando funciones logarítmicas y exponenciales [Sobrero et. al 2020].



El detalle del mapa de la izquierda muestra los desplazamientos de la estación de 2016 a 2021 en la zona centro-norte de Chile, con movimientos en dirección noreste en el norte y con un movimiento en forma de "S" en la zona central que marca la complejidad del comportamiento. En la imagen de la derecha, las estaciones PFRJ, OVLL, BN17 y PEDR indican un movimiento NW, mientras que el movimiento 50 km hacia el sur es en dirección NE. Este aspecto ha sido un desafío para el modelo de deformación, donde la correlación espacial es baja.



Transición de MR clásico a MR moderno. Modelo de deformación

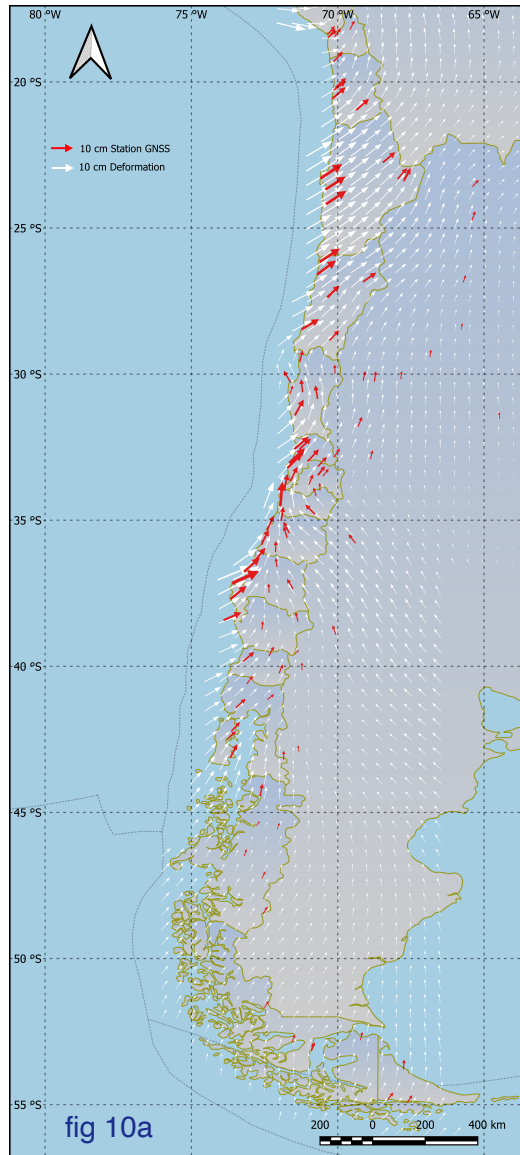


fig 10a

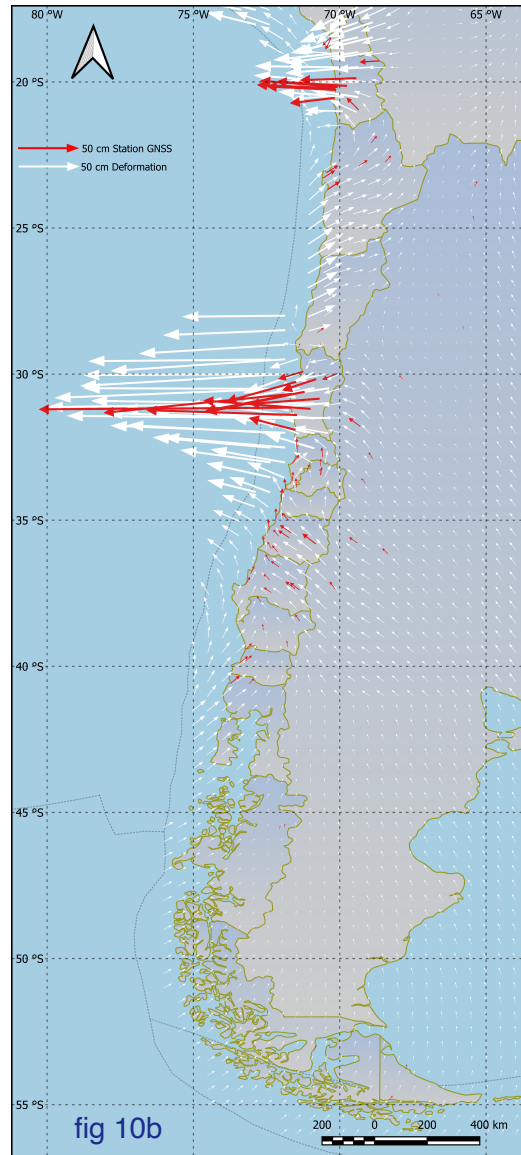


fig 10b

- Se genera un modelo de deformación que se divide en tres partes: componentes intersísmicos, cosísmicos (fig. 10b) y postsísmicos (10a).
- La Figura 10b muestra el desplazamiento en el modelo cosísmico para los terremotos de Coquimbo (8,3 Mw) e Iquique (8,2 Mw)
- Se utilizan exclusivamente los datos de las estaciones GNSS , interpolando lo que sucede entre ellas solo con información geodésica.

Para modelar proponemos una interpolación de spline de placa delgada (TPS) (Fig. 10c).

La validación cruzada se realizó complementando nuestros datos con información de posicionamiento puntual preciso (PPP) del Laboratorio Geodésico de Nevada (NGL). Los resultados de la validación cruzada de datos muestran a $\mu = 0.0001 \text{ m}$ and a $\sigma = \pm 0.005 \text{ m}$

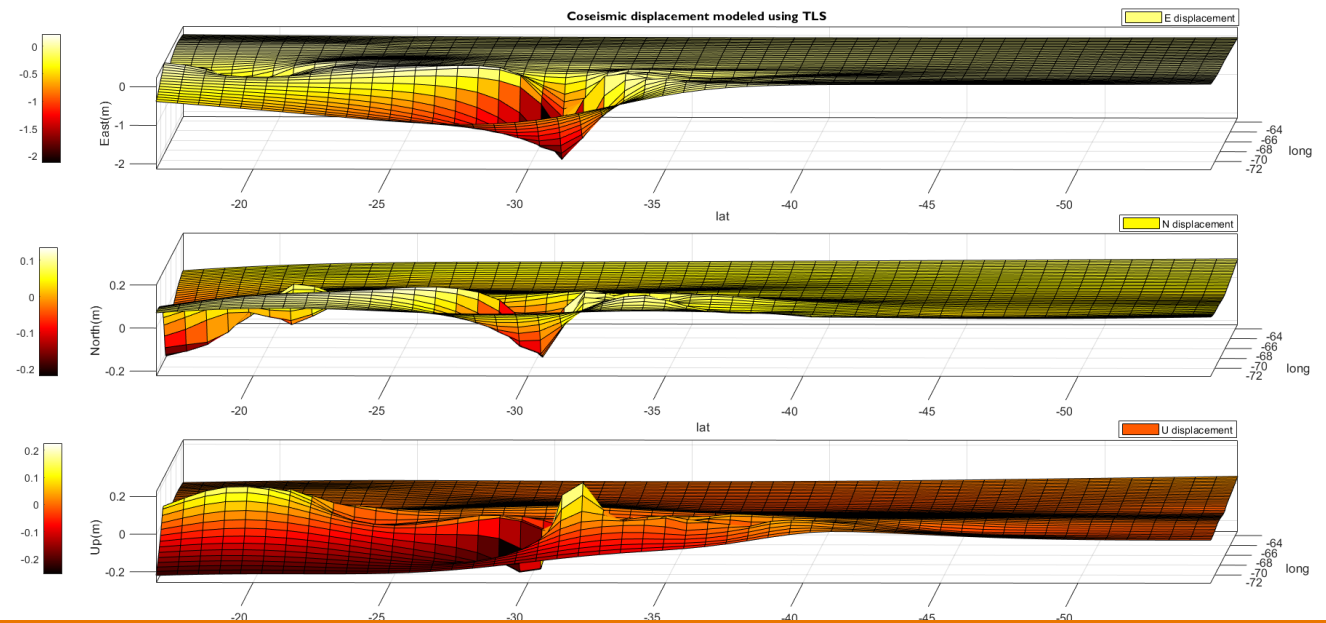
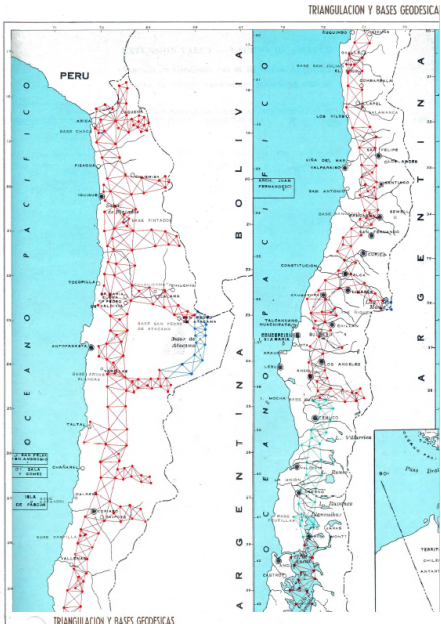
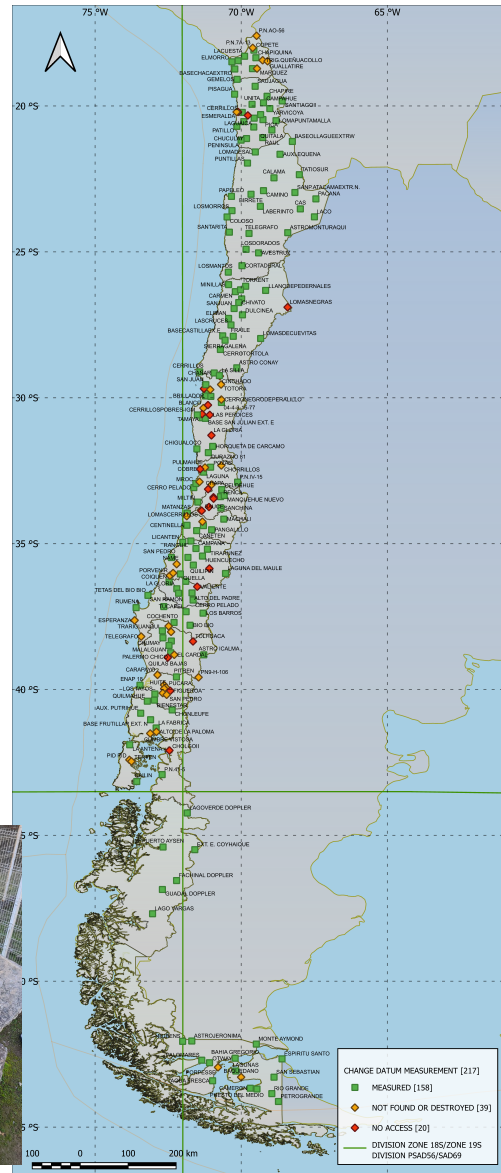


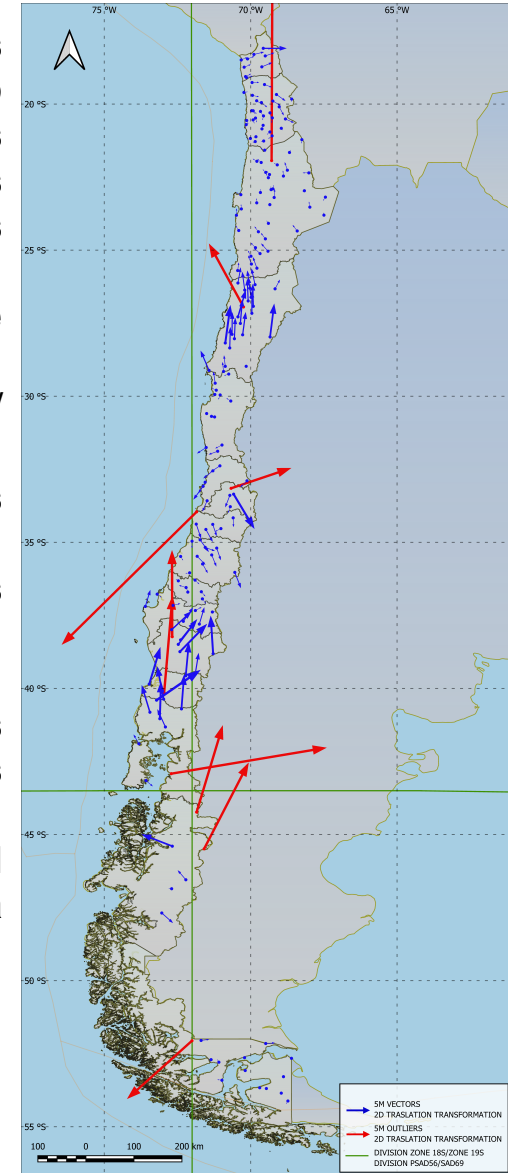
fig 10c



- Para relacionar ambos sistemas, necesitamos coordenadas actualizadas en el sistema moderno en los puntos de referencia PSAD56-SAD69.
- Actualmente, la red clásica (imagen izquierda) no se mantiene, por lo que se realiza una revisión de la base de datos IAGS-IGM para seleccionar vértices nativos que se puedan medir con GNSS.
- Medimos con GNSS sobre los puntos de referencia de la red primaria PSAD56-SAD69 (imagen derecha):
 - Selected #217
 - Measured #158
 - Destroyed #39
 - Inaccessible #20



- Comprobamos valores atípicos contrastando (incrementos geodésicos) las coordenadas en los dos sistemas.
- Hay 10 puntos de referencia con coordenadas PSAD56/SAD69 incorrectas. Eliminamos esas coordenadas.
- Hay dos zonas (Atacama y Región Central) con deformaciones diferentes a las de las otras partes del país.
- **Results: Red geodésica secundaria @2022.00 (pasiva): REDGEOMIN**



original triangulation network, (Maturana et. al 2005)

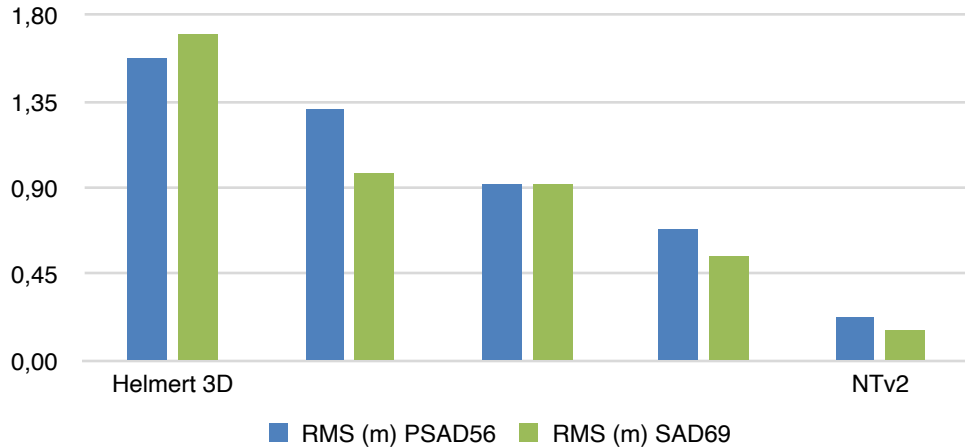
Objetivo:

Calcular parámetros de transformación entre MR clásicos (PSAD56-SAD69) y MR para minería en Chile. **Los parámetros deben mantener la forma, tamaño y orientación de la concesión minera en el catastro digital y deben ser únicos para todo Chile sin dividir el país.**

Dos enfoques:

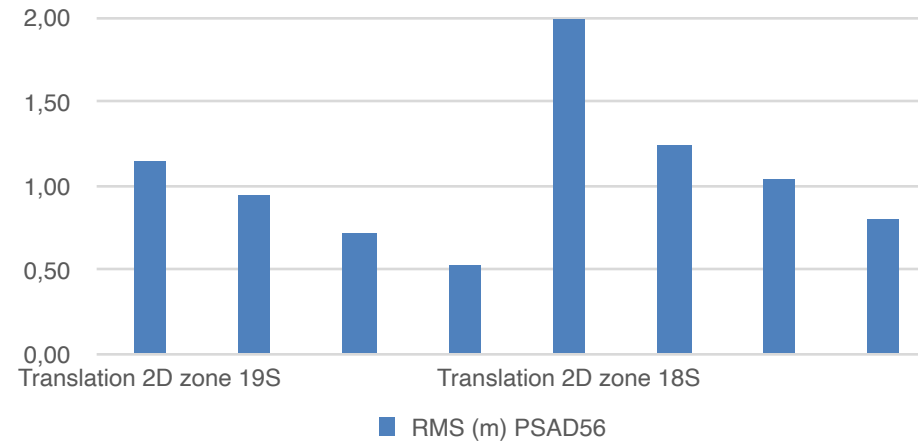
- evaluamos una transformación clásica para todo el país, y otra a través de compensaciones de red (NTv2)
- **2d con solo traducciones para evitar la deformación de la concesión minera**

RMS (m) residuales

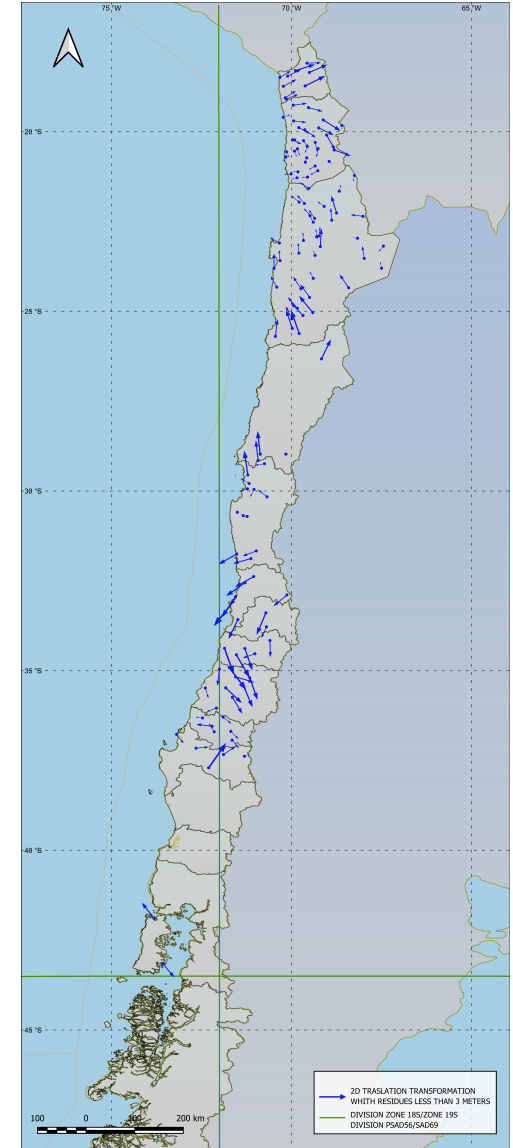


Total Control Points	157				
Selected Control Points	108	89	57	38	143
Total Control Points	20				
Selected Control Points	15	12	11	6	15

RMS (m) residuales



Total Control Points	134								23	
Selected Control Points	116	97	72	46	16	11	10	7		

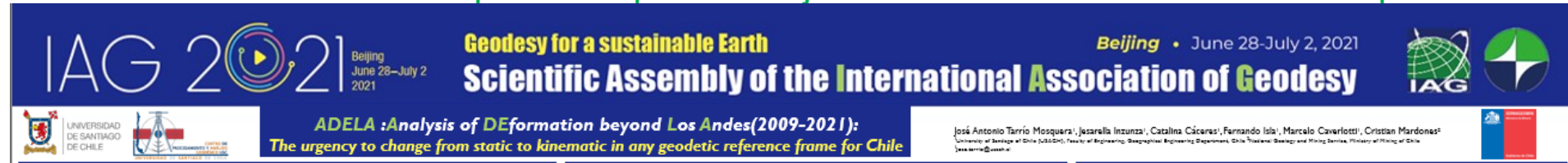




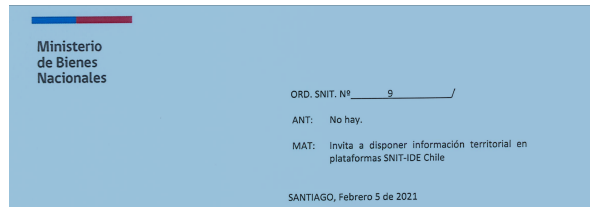
Según el caso de Islandia, para implementar una RF moderna, es necesario considerar ([Pascal Kierulf et al. 2019](#))

1. Modelos de deformación con suficiente precisión para trabajar en coordenadas de diferentes épocas.
2. Repositorios geodésicos abiertos y que pueden emplear marcos de referencia cinemáticos.
3. Una forma de distribuir el marco de referencia a los usuarios, por ejemplo, servicios de posicionamiento, y/ calculadoras
4. Transformaciones a otros marcos de referencia.
5. La base legal de los marcos de referencia cinemáticos.
6. Formación y capacitación de geomensores y usuarios de SIG.
7. Una infraestructura geodésica activa suficientemente densa, como las estaciones de referencia de operación continua (CORS) con coordenadas conocidas en un marco de referencia global (por ejemplo, ITRF).
8. Manejo en los sistemas SIG y GNSS de MR cinemáticos.
9. La disposición de los usuarios a utilizar dicho sistema.

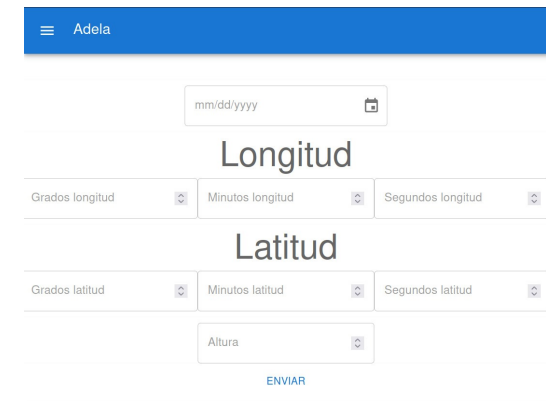
1. Modelos de deformación con suficiente precisión para trabajar en coordenadas de diferentes épocas.



2. Repositorios geodésicos abiertos y que pueden emplear marcos de referencia cinemáticos:



3. Una forma de distribuir el marco de referencia a los usuarios, por ejemplo, servicios de posicionamiento, y/ calculadoras



4. Transformaciones a otros marcos de referencia.
5. La base legal de los marcos de referencia cinemáticos

Artículo 10.- Introdúcense las siguientes modificaciones en el Código de Minería:

6. Formación y capacitación geomensores y usuarios GIS

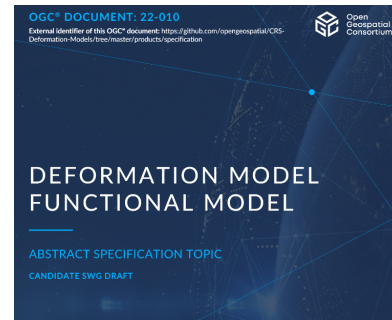
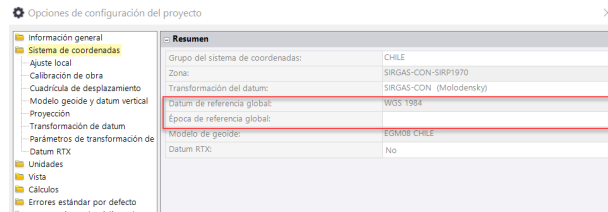
2. Intercálase en el numeral 2 del artículo 43, entre las siglas "U.T.M." y la expresión "que correspondan", las palabras "referidas a datum **SIRGAS**".

3. Intercálase en el inciso primero del artículo 45, entre las siglas "U.T.M." y la expresión "con precisión", las palabras "referidas a datum **SIRGAS**".



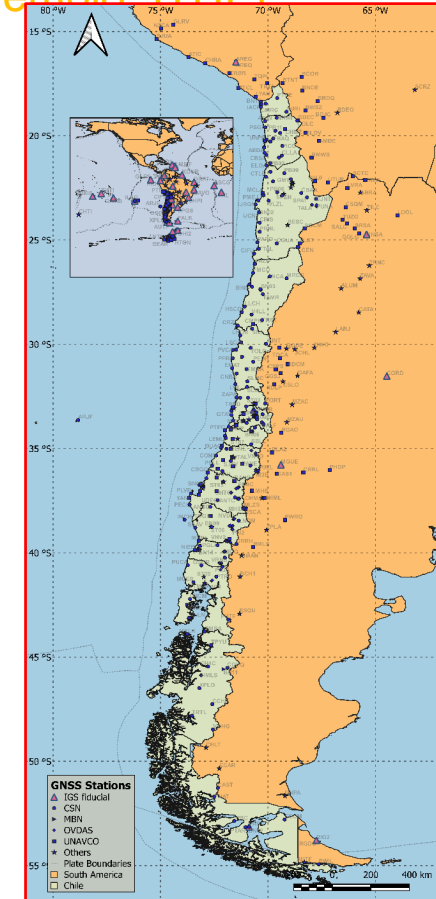
ANTOFAGASTA
MINERALS

- Una infraestructura geodésica activa suficientemente densa, como las estaciones de referencia de operación continua (CORS) con coordenadas conocidas en un marco de referencia global (por ejemplo, ITRF)
- Manejo en los sistemas SIG y GNSS de MR cinemáticos.



<https://github.com/opegeospatial/CRS-Deformation-Models/blob/master/products/specification/abstract-specification-deformation-model-functional-model.pdf>

- La disposición de los usuarios a utilizar dicho sistema.



Seminario 30 de noviembre, sobre marcos de referencia para minería en Chile, y SIRGAS



Muchas gracias

Transition from PSAD56/SAD69 to SIRGAS. *Toward a kinematic reference frame for mining in Chile*

José Antonio Tarrío Mosquera^{1x}, Jesarella Inzunza Muñoz¹, Catalina Caceres Venegas¹, Marcelo Caverlotti Silva¹, Valeria Vásquez Tejo¹, Fernando Isla Rodríguez¹, Gabriel Jeldres², Rodrigo Urrutia², Cristian Mardones²

¹Centro de Procesamiento y Análisis Geodésico USC
Universidad de Santiago de Chile

²Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile