

Manual del curso de tratamiento de datos espaciales

Autor: Rocco Abel Luciano Rabilotta Pisters

Dedicatoria:

A la memoria de un amigo con el que empecé este viaje por el mundo de la geografía informatizada, a José Fernando Segura Rodríguez.

Sobre este documento

Título: Manual del curso de tratamiento de datos espaciales.

Autor: Rocco Abel Luciano Rabilotta Pisters.

Versión: 01.04

Bitácora

Versión	Fecha	Siglas	Observaciones
00.01	01/09/2020	RRP	Inicio del proceso de elaboración.
00.02	27/09/2020	RRP	Primera versión preliminar, sin conclusiones ni ejercicios.
00.03	13/10/2020	RRP	Versión preliminar para revisión.
01.04	05/06/2023	RRP	Correcciones de errores.

Derechos

© 2020-2023. Rocco Abel Luciano Rabilotta Pisters. Todos los derechos se encuentran reservados.

Abreviaturas, acrónimos y siglas

CAD	Computer assisted design (Diseño asistido por computadora).
ETL	Extraction, transformation and loading.
FGDC	Federal geographical data committee.
GIS	Geographical Information System (Sistema de información geográfica).
GRAD	Gradianes.
GRS80	Global Reference System 1980.
NAD	North American Datum.
OGC	Open Geospatial Consortium.
RAD	Radianes.
UTM	Universal Transverse Mercator.
WGS84	World Geodetic System 1984.

Índice general

SOBRE ESTE DOCUMENTO	3
BITÁCORA	3
DERECHOS.....	3
ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS Y SIGLAS	3
ÍNDICE GENERAL	4
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	7
INTRODUCCIÓN.....	10
LA CALIDAD DE LOS DATOS ESPACIALES	11
EL LINAJE DE LOS DATOS.....	11
LA EXACTITUD DE LA POSICIÓN.....	12
CONSISTENCIA LÓGICA	14
EXACTITUD DE LOS ATRIBUTOS	15
COMPLETITUD.....	16
USO, PROPÓSITO Y LIMITACIONES	16
CALIDAD TEMPORAL	17
RESOLUCIÓN.....	17
PROYECCIONES, SISTEMAS DE REFERENCIA Y SUS TRANSFORMACIONES	18
COORDENADAS	18
<i>Coordenadas geográficas.....</i>	<i>18</i>
<i>Coordenadas cartesianas.....</i>	<i>20</i>
SISTEMAS DE REFERENCIA.....	20
<i>Elipsoides.....</i>	<i>20</i>
<i>Datum.....</i>	<i>21</i>
PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS	22
<i>Conceptos básicos</i>	<i>22</i>
Sistemas de coordenadas.....	22
Transformaciones.....	24
Proyecciones.....	27
Escalas.....	27
<i>Clasificación de las proyecciones</i>	<i>29</i>
<i>Proyecciones cilíndricas.....</i>	<i>30</i>
Regulares (Normal).....	30
Ecuaciones para la transformación directa	32

Ecuaciones para la transformación inversa	33
Transversales	34
Ecuaciones para la transformación directa	35
Ecuaciones para la transformación inversa	37
UTM	38
UTM Modificada	39
<i>Proyecciones cónicas</i>	40
Proyección Cónica Conforme de Lambert	40
Ecuaciones para la transformación directa	41
Ecuaciones para la transformación inversa	42
<i>Consideraciones importantes sobre las proyecciones</i>	44
TRANSFORMACIONES GEOGRÁFICAS	44
PROCESOS ETL GEOGRÁFICOS, LAS MEJORES PRÁCTICAS	50
DEFINICIÓN DEL PROCESO ETL	50
<i>Los requisitos</i>	51
Problemas más comunes con los datos espaciales	52
Valores de las coordenadas fuera de rango	52
Unidades de almacenamiento no convenientes	53
Características del componente espacial de los datos	55
Características del componente alfanumérico de los datos	61
<i>Lectores y escritores</i>	63
<i>Transformaciones</i>	64
<i>Diseño de procesos ETL</i>	68
<i>Ejecución del proceso ETL</i>	71
EL ESTADO DEL ARTE EN LOS SIG	73
DESARROLLO DE LOS SIG	73
1964-1999	73
2000-2019	76
SITUACIÓN ACTUAL	78
OSGeo	78
Soluciones de escritorio	79
QGIS	79
gvSIG	79
Soluciones servidores	79
MapServer	79
GeoServer	80
ESRI	80

Soluciones de escritorio	80
ArcGIS Desktop	80
ArcGIS Server	81
Servicios en la nube	82
ArcGIS Online	82
<i>Hexagon Geospatial</i>	82
Soluciones de escritorio	82
Geomedia Desktop	82
ERDAS Imagine.....	84
Soluciones servidores.....	84
Geomedia Web Map.....	84
Geomedia Smart Client.....	85
M.App Enterprise.....	85
Luciad Fusion	85
Librerías y componentes para desarrollo	85
Luciad LightSpeed	85
Luciad RIA	86
<i>Safe Software</i>	86
EJERCICIOS.....	87
PREGUNTAS.....	87
EJERCICIOS	88
LECTURA RECOMENDADA.....	90
BIBLIOGRAFÍA	91

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Ejemplo ilustrativo del linaje de varios conjuntos de datos que comparten un origen común. ..</i>	12
<i>Ilustración 2. Modelo de objetos geométricos de las especificaciones “Simple Features”. Fuente: (OGC, 2010).</i>	15
<i>Ilustración 3. Elipsoide que representa a la Tierra. Podemos observar la forma en que un punto P sobre la superficie de este elipsoide de representa tanto en un marco de referencia ortogonal XYZ como en uno a partir de los ángulos λ, φ y ν, conocidos como “coordenadas geográficas”.</i>	19
<i>Ilustración 4. Sección de un elipsoide (elipse), donde podemos observar el semieje mayor (a) y el menor (b).</i>	20
<i>Ilustración 5. Muestra el proceso de representación de un punto entre dos espacios.....</i>	22
<i>Ilustración 6. En un marco de referencia polar se muestran diferentes ejemplos de lugares y objetos geométricos.....</i>	23
<i>Ilustración 7. Representación de la ecuación (xiii).....</i>	25
<i>Ilustración 8. Representación de la ecuación (xiv).....</i>	25
<i>Ilustración 9. Ejemplo de la transformación de los tres vértices de un triángulo aplicando la transformación definida en las ecuaciones (xvi) y (xvii). Podemos apreciar que el triángulo transformado se ha deformado en el sentido tanto de rotación, de escala como de traslación, como su fuese “estirado y girado”.....</i>	26
<i>Ilustración 10. Podemos observar que la figura sobre la superficie esférica es proyectada sobre el plano. En la superficie esférica las aristas son curvas, pero en el plano son rectas. Esta es una proyección ilustrativa.</i>	27
<i>Ilustración 11. Ejemplo ilustrativo que asume que el meridiano central (naranja) y los dos meridianos (naranja punteados), marcan la zona de confianza de la proyección en cuanto a su factor de escala en el intervalo $[0.9996,1)$.....</i>	28
<i>Ilustración 12. Cuadro sinóptico de la clasificación de las proyecciones.</i>	30
<i>Ilustración 13. Esta es una ilustración de una proyección cilíndrica, donde se “proyecta” un triángulo en la superficie esférica hacia el plano, lográndose esto proyectando “rayos imaginarios” desde el centro hacia el cilindro, colocado tangente en su “ecuador”. Al abrir este cilindro, podemos apreciar la figura proyectada..</i>	31
<i>Ilustración 14. Mapamundi de Mercator “Nova et aucta orbis terrae descriptio ad usum navigatium emendate accomodata”, 1569. Es un ejemplo de un mapa en esta proyección, creado por él, donde la diferencia con los mapas en esta proyección contemporáneos a nosotros radica en la fuente de los datos. Es un detalle interesante que Mercator nunca dejó el continente europeo, elaboró sus mapas a partir de datos obtenido por exploradores y navegantes.</i>	31
<i>Ilustración 15. Vista de una sección del elipsoide (elipse) que muestra como los puntos en la superficie, se dispersan verticalmente con mayor pronunciamiento hacia los polos. Otro factor importante radica en la dependencia del radio ν con el valor de φ, la latitud.....</i>	32
<i>Ilustración 16. La proyección transversa de Mercator es una proyección transversa cilíndrica que asume que este se coloca de forma horizontal, donde el meridiano central es cuasi-tangente.</i>	34

<i>Ilustración 17. Esta es la vista superior (observamos el plano ecuatorial) donde se observa como las longitudes proyectadas en el plano del cilindro se dispersan en la medida en que se alejan del meridiano central.</i>	<i>34</i>
<i>Ilustración 18. Mapa que muestra los husos (zonas) UTM.</i>	<i>38</i>
<i>Ilustración 19. Las proyecciones cónicas se obtienen empleando un cono como espacio de proyección. Estos pueden ser tangentes o secantes.</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 20. Este es un ejemplo de la proyección Cónica Conforme de Lambert para México (EPSG 6372), donde el meridiano central de ubica en -102.5 grados, los paralelos estándares son 17.5 y 29.5 grados. Con un falso Este de 2,500,000 m. El elipsoide de referencia es el GRS80.</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 21. ρ es la norma de un “vector” (la distancia) que se define entre el punto P_j y un punto definido a partir de los falsos Este y Norte.</i>	<i>43</i>
<i>Ilustración 22. Los puntos azules representan una serie de puntos en un sistema DATUM/Elipsoide. Los puntos rojos son los mismos puntos, pero referentes a otro sistema DATUM/Elipsoide.</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 23. En esta ilustración podemos apreciar los vectores que indican la dirección y magnitud de estas diferencias.</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 24. Algunas transformaciones y el contexto de su empleo.</i>	<i>47</i>
<i>Ilustración 25. Definición OGC WKT de la proyección Cónica Conforme de Lambert definida por el INEGI (EPSG 6372). Notemos que en DATUM el valor es “unknown” (desconocido) y se define el esferoide (elipsoide). Fuente: https://epsg.io/6372.</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 26. Definición de la transformación NAD27 a NAD83 a través del método de la rejilla para Canadá. Notemos el valor de GRID_FILE que apunta a un archivo con datos de puntos regulares de control en ambos marcos de referencia geográficos. Notemos el error es del orden de 5×10^{-8} y la exactitud es de 0.150000006 FME Workbench 2019.2.</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 27. Este es un caso en el que podemos observar predios provenientes de una fuente (catastral) en la que los datos se encuentran almacenados en coordenadas geográficas. Es ejemplo se realizó con QGIS. https://qgis.org/es/site/</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 28. Geomedia Viewer (gratuito) posee una aplicación denominada “Define Coordinate System File”, que además de mostrar las características de las proyecciones y marcos de referencia, permite definir las. En la ilustración observamos la definición de EPSG 4326, y podemos ver que la tercera pestaña (“Projection Space”) tiene un campo denominado “Projection Algorithm” (algoritmo de proyección) con el valor “Cilíndrico Equirectangular”. Ejemplo con Geomedia Viewer 2020. https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/geomedia-add-ons/geomedia-viewer.</i>	<i>54</i>
<i>Ilustración 29. EPSG 4326, su definición en FME Workbench 2019.2.</i>	<i>55</i>
<i>Ilustración 30. Si la exactitud fuese mayor que el valor de ϵ entonces estaremos en la presencia del caso de que P_2 y P_3 son redundantes (izquierda). En la parte derecha observamos el mismo elemento “corregido”, y podemos apreciar que P_3 ya no forma parte de la definición de la polilínea.</i>	<i>56</i>

<i>Ilustración 31. Dos ejemplos, uno de polilínea y otro de polígono que se auto intersecan.....</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 32. Representación topológica de un polígono. La cara es el interior, la frontera es la “orilla” y el nodo es el punto inicial que define al elemento geométrico.</i>	<i>57</i>
<i>Ilustración 33. Podemos apreciar que la parte “sólida” se define por los puntos en el sentido contrario a las manecillas del reloj y el hueco en el sentido contrario.</i>	<i>59</i>
<i>Ilustración 34. Ejemplo de un municipio con su “isla”.</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 35. El caso de la izquierda con una falsa intersección, el de la derecha con una intersección verdadera. Notemos que en la izquierda son dos segmentos, el de la derecha son cuatro.</i>	<i>60</i>
<i>Ilustración 36. Modelo tipo de una red.....</i>	<i>61</i>
<i>Ilustración 37. Lista (vista parcial) de los formatos de datos soportados para la lectura en FME.....</i>	<i>63</i>
<i>Ilustración 38. Opciones del lector de datos para la lectura de datos en formato SHP en FME.</i>	<i>64</i>
<i>Ilustración 39. Transformación de proyección (cambio) en FME.....</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 40. Validación de la geometría (vectorial) en FME.</i>	<i>67</i>
<i>Ilustración 41. Filtrado espacial de un flujo de datos en FME.</i>	<i>68</i>
<i>Ilustración 42. FME Workbench es un ambiente de diseño y ejecución de procesos ETL espaciales con la mayor cantidad de operaciones de transformación y formatos de lectura y escritura disponibles en el mercado actualmente. FME 2019.2.</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 43. Ejemplo de un proceso ETL, en FME.....</i>	<i>69</i>
<i>Ilustración 44. Flujo equivalente al de la ilustración anterior, pero presentado de forma “genérica” es decir no dependiente de ningún ETL o GIS en espacial.....</i>	<i>70</i>
<i>Ilustración 45. Ejemplo de un reporte de los resultados de un proceso ETL espacial.....</i>	<i>71</i>
<i>Ilustración 46. Una “instantánea” del proceso de ejecución de un proceso ETL espacial con FME 2019.2.</i>	<i>72</i>
<i>Ilustración 47. Así se veía la primera versión del servicio de Google Maps en el año 2005.</i>	<i>77</i>
<i>Ilustración 48. Evolución de las soluciones de escritorio de ESRI.....</i>	<i>81</i>

Introducción

Es usual que se conozca como curador al especialista en artes plásticas que define los procedimientos de cuidado de las obras de arte visuales en los museos. Personalmente me gusta este concepto para definir las tareas relativas al cuidado y publicación de datos espaciales, guardando las distancias que existe entre el mundo del arte y el de la cartografía.

La popularización del uso de datos espaciales es un fenómeno que no podemos ignorar y conduce hacia una serie de nuevos problemas relacionados con la enorme cantidad que se producen por diferentes vías. Es en términos generales positivo porque indica la creciente conciencia de la importancia de conocer los diferentes aspectos de nuestro planeta e incluso de espacios interiores o elementos ocultos bajo la superficie. Sin embargo, también ha producido una serie de fenómenos nuevos que impacta en la calidad de los datos espaciales.

En un extraordinario documento de tesis de grado de Oort, Pepijn (Oort, 2006) este expone las razones que han exacerbado este fenómeno, a partir de los siguientes puntos:

- i. Hay un creciente acceso e intercambio de datos espaciales;
- ii. Existe un grupo creciente de usuarios espaciales menos conscientes de la calidad de estos;
- iii. Los sistemas de información geográficos (GIS) contemporáneos permiten un sinnúmero de aplicaciones sin considerar la calidad de los datos espaciales;
- iv. Estos sistemas (GIS) prácticamente no ofrecen herramientas de control de calidad de los datos espaciales y
- v. Hay una distancia creciente entre aquellos que usan los datos (usuarios finales) y aquellos que están mejor informados acerca de la calidad de estos (los productores de datos).

Esta identificación por parte de Oort, Pepijn es realmente muy acertada y podríamos decir casi clarividente, si se considera que fue planteado con anterioridad a la popularización del uso de mapas a partir de servicios como Google Maps o Bing Maps.

La calidad de los datos espaciales

La determinación de la calidad de los datos espaciales o geográficos se debe realizar considerando que existen varios factores que tienen un papel. Según Pepijn Oort (Oort, 2006), los criterios para la evaluar la calidad de estos han sufrido una evolución en la medida en que se ha concientizado sobre su importancia y se ha considerado la evolución tecnológica. Desde Aronoff (Aronoff, 1989) hasta el establecimiento de los estándares definidos por *ISO/TC211* (*ISO 19113*¹, *19114*² y *19115*³) en el 2002. Ahora bien, desde la perspectiva institucional fue el *FGDC* con su *USA-SDTS* (*United States Spatial Data Transfer Standard*) en 1992 la primera versión con una visión a largo plazo, con una visión que condujo a la interoperabilidad y posterior creación de *OpenGIS* (ahora *OGC* “*Open Geospatial Consortium*”).

La calidad de los datos y los metadatos poseen una relación intrínseca, casi orgánica, porque a partir de estos últimos se puede conocer la fuente originaria de los datos (su génesis), los procesos sometidos, la exactitud de estos en cuanto a la posición y a los atributos, su propósito y uso, la variación de la calidad y su resolución.

El linaje de los datos

La historia de los datos, desde su creación, considerando la técnica y tecnología empleados, los procesos a los que se ha sometido, los diferentes responsables por su actualización y cuidado a lo largo del tiempo, etc., es lo que llamamos linaje. El linaje es fundamental para comprender por ejemplo para determinar los procesos y así poder conocer los factores que impactaron en su calidad en cuanto a la exactitud posicional o las variaciones en su calidad.

¹ *ISO 19113 – Principios de calidad.*

² *ISO 19114 – Evaluación de la calidad.*

³ *ISO 19115 – Metadatos espaciales.*

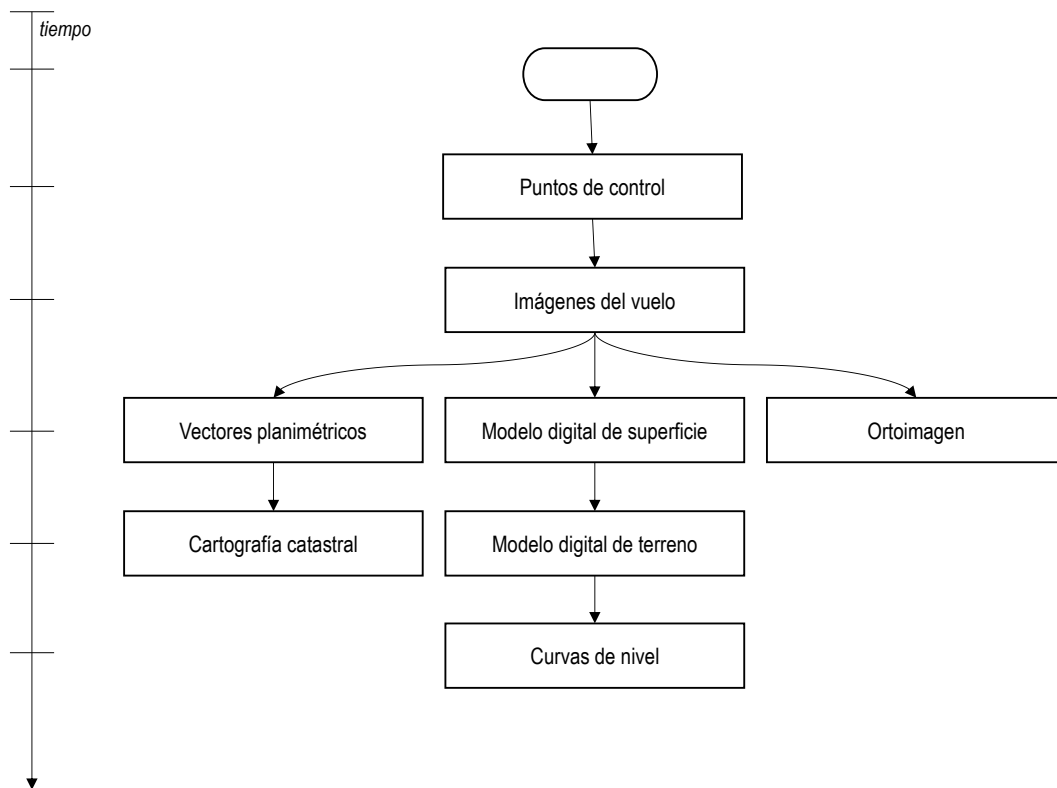


Ilustración 1. Ejemplo ilustrativo del linaje de varios conjuntos de datos que comparten un origen común.

La exactitud de la posición

La exactitud de la posición tiene que entenderse como el resultado del cálculo de los errores totales. El error total es la distancia entre la media de las mediciones (según la teoría de errores) y el valor real.

La exactitud de la posición puede ser relativa o absoluta. La primera es la relativa a otro conjunto de datos y la segunda se relaciona con las coordenadas de datos en el mismo sistema de referencia. A su vez, la exactitud puede hacer referencia a valores horizontales (considerando un espacio proyectado plano) o vertical, referido a los valores z .

Veamos un ejemplo: Supongamos que contamos con cartografía catastral. Esta por lo general se obtiene a partir de un vuelo bajo (para los parámetros de los vuelos tripulados) donde usualmente se emplea una avioneta y una cámara fotogramétrica, don posicionamiento satelital (*GNSS*) y un sistema de estabilización que absorbe las vibraciones del motor y los pequeños movimientos involuntarios producto del propio vuelo. Ese equipo, que desde hace más de veinte años es digital, obtiene pares estereoscópicos que se emplean para realizar el proceso de vectorización que se denomina restitución fotogramétrica. La ventaja de la tecnología digital es que no existen deformaciones en los soportes materiales porque estos no existen y los errores relacionados con el proceso de digitalización son menores porque los medios son muchos más cómodos y precisos que los analógicos (*stereoplotters*) empleados anteriormente como en los equipos Wild, Bernoulli, etc.

Un vuelo bajo, 1:4,500 produce una granularidad o detalle tal que permite una determinación de detalles de alrededor del orden de 1 a 3 cm (en el terreno), cuando el aire es limpio y la calibración de la cámara es ideal. Sin embargo, en la práctica la capacidad de discernir detalles es de alrededor de 5 a 10 cm, quizás más cercano a este último valor.

El proceso complementario y necesario es el apoyo terrestre. Este proceso consiste en obtener lecturas directas de posiciones en el terreno y establecer monumentos o marcas visibles en la foto. Dado que son posiciones con coordenadas conocidos, obtenidos por medios directos (astronómico, GPS, etc.), son datos conocidos sobre el espacio-mapa. Estos puntos permiten corregir las distorsiones de las fotos y referirlos al espacio terrestre.

La restitución por su parte es un proceso donde el factor humano es crítico porque la interpretación de los rasgos es una tarea que el técnico debe realizar, aunque actualmente los programas de cómputo asisten de forma muy eficaz estas tareas.

La intensión de un mapa catastral es delimitar los linderos de las propiedades. De ahí que la selección del vuelo sea a esa escala para poder diferenciar rasgos de tamaños equivalentes a bardas, muros, plantas, etc. La escala catastral es 1:1,000, es decir 1 mm del mapa representa un a 1 m de la realidad. Ahora bien, su significado en el mundo de los mapas digitales vectoriales no es exactamente ese o no tiene mucho sentido interpretarlo así porque la definición viene del mundo analógico con soporte en papel, es decir mapas en papel.

La pregunta es: ¿Cuál es el detalle que puede describirse en la cartografía digital? Debemos entender que la representación vectorial es precisamente una “representación” es decir no es la cosa en sí misma, sino una interpretación realizada por un técnico fotogrametrista. Ahora, bien, si consideramos que una foto 1:4,500, producto de un vuelo no mayor a 1,000 m (depende de la cámara) y un negativo (suponiendo que fue obtenido con una cámara analógica), con granos lo suficientemente pequeños y que el negativo es relativamente grande, podemos sin duda discernir detalles por debajo de los 10 cm, pero no por debajo de quizás 2 a 5 cm sin comprometer nuestra capacidad visual, entonces si a esto añadimos que un GPS de doble canal puede lograr posiciones con una exactitud de alrededor 1 cm en el plano XY (horizontal), pero con un error de ese mismo orden considerando que el pedestal es un equipo que no es fijo, sino fijado temporalmente, y que los técnicos pueden o no haber marcado con todo lujo de precisión el monumento o marca, entonces considerar los 2 a 5 cm es una suposición suficiente para el destino de esta cartografía. Considerando que el técnico puede cometer (y lo hace) errores en su trabajo, entonces seguimos con el intervalo 2 a 5 cm como una buena suposición, en el sentido que podemos asegurar que cualquier rasgo igual o superior a 10 cm en el terreno puede ser correctamente interpretado⁴, con una exactitud de alrededor 3.5 cm. Si la representación en el mundo de los mapas digitales vectoriales siempre tiene su dato atómico la posición (un punto) que usualmente se convierte en el vértice de un

⁴ Considerando que es necesario al menos 3x3 pixeles para identificar algo.

polígono o de una polilínea, podemos asegurar que cualquiera de dos vértices que tengan una distancia entre ellas de menos de la exactitud o incluso de su orden no tiene sentido.

En los tiempos en los que la restitución digital era en realidad híbrida, es decir, realizada con equipos analógicos con codificadores digitales que interpretaban las coordenadas y en un programa **CAD** (*Computer Assisted Design*) se realizaban los trazos, era común que se produjeran fenómenos denominados microtrazos⁵ que conducían a problemas en la calidad de los datos cuando se empleaban en los sistemas de información geográficos. En los años noventa del pasado siglo y en la primera década de nuestro siglo era un problema común y muy poco atendido.

Entonces el exceso de detalles que no aportan ningún valor a la caracterización de la realidad no sólo no es necesario, sino que también debe considerarse como un elemento que puede contribuir a problemas de calidad si el propósito de la cartografía no lo necesita.

Consistencia lógica

La consistencia lógica consiste básicamente en la relación entre los datos y su estructura, es decir el nivel de congruencia que hay entre ambos. No se refiere a la relación o cercanía con la que la data describe al fenómeno.

La consistencia lógica ha evolucionado desde la aproximación a diferentes aspectos de la data espacial:

- a. Que los valores son válidos, los aspectos geométricos y topológicos fueron los aspectos centrales del estándar USA-SDTS. Es una aproximación formal;
- b. Para la CEN/TC287 la geometría, la semántica y la topología fueron sus aspectos más importantes o centrales y
- c. La consistencia conceptual, de dominio, formato y topología terminó por serlo para el ISO/TC211.

Ahora bien, es un tanto abstracto cuando mencionamos así los diferentes elementos a evaluar, debemos dejarlos más claros. Es fundamental que se consideren los siguientes:

- a. **La geometría**, es decir la forma en la que se definen las conformaciones geométricas de los elementos. La forma en la que se construye por ejemplo una polilínea, un polígono, un punto, inclusive, considerando el estándar de referencia. Normalmente será el *Simple Features* (OGC, 2010) con sus partes 1 y 2.

⁵ Existió un producto denominado *MRFClean* que por algún tiempo resolvió de la forma más completa este tipo de problemas con una estrategia de solución interesante: a partir de la data original, con los parámetros que el usuario definía, desarmaba la cartografía y la ensamblaba para los criterios nuevos, permitiendo obtener datos vectoriales sumamente consistentes. Desafortunadamente ese tipo de aplicaciones ya no existen.

- b. **La topología**, entiendo que esta se refiere no a la configuración geométrica, sino a la representación para poder realizar operaciones espaciales con ella. La topología almacena una representación simplificada basada en nodos, vértices y caras. La diferencia, por ejemplo, entre la geometría y su representación topológica, es que esta última no tiene ninguna utilidad para la mensurabilidad, es decir determinar su perímetro o área. Es la geometría la que debe proveernos esa data, inversamente la geometría no nos puede indicar si dos polígonos guardan una relación de sobreposición.

La topología es por lo general una representación que se crea de forma dinámica. Es poco usual que se almacene, así para efectos de interoperabilidad de fuentes de datos es un aspecto realmente poco relevante.

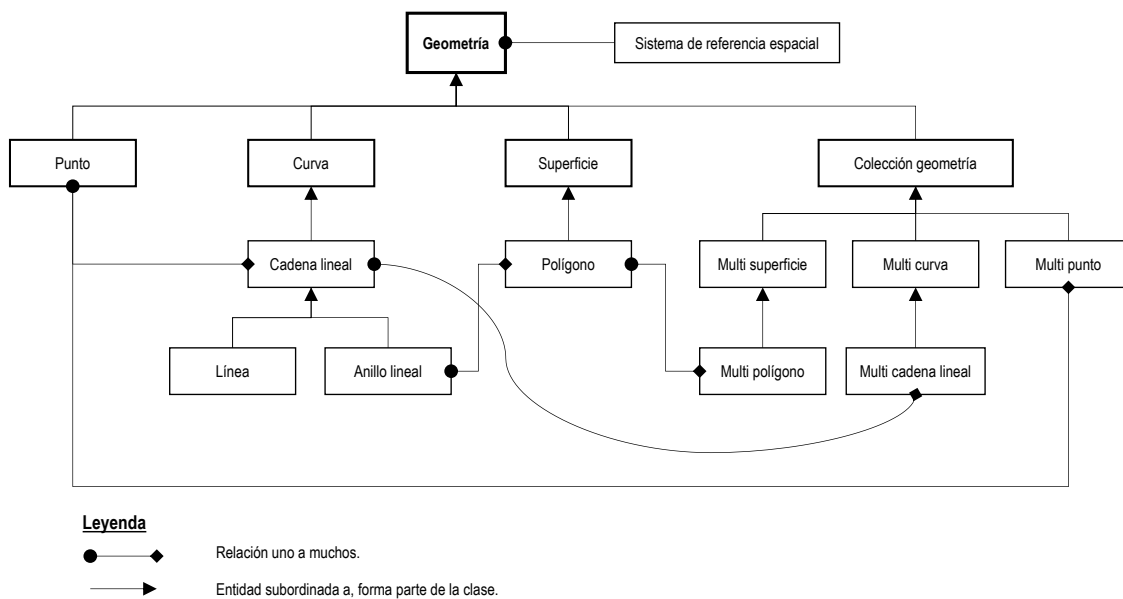


Ilustración 2. Modelo de objetos geométricos de las especificaciones "Simple Features". Fuente: (OGC, 2010).

- c. **Estructura de atributos**, donde estos se almacenan. Así como ejemplo el almacenamiento de datos de tipo entero (número entero de 32 bits) en un campo *varchar* o equivalente no es congruente a menos que los valores no representen cantidades u orden cardinales sino simplemente son nominales.

El tamaño de los campos y su tipo deben guardar una relación lógica con lo que pretenden caracterizar.

Exactitud de los atributos

Se refiere a exactitud de los datos diferente a la posición y al tiempo. La exactitud de los atributos se puede entender como cuál es la certeza que tenemos que los atributos caracterizan correctamente a un rasgo o fenómeno.

Podemos encontrarnos problemas de exactitud por ejemplo en el dominio de los datos, digamos como caso ilustrativo, que de un dominio válido de 0 a 10, encontremos valores menores a cero o mayores a 10.

Encontraremos de exactitud de los atributos como (Oort, 2006):

- a. **Problema relativo a la relación o cociente**, cuando el valor de un campo representa un denominador de un cociente. Digamos una escala nominal, una proporción, etc.
- b. **Problemas con intervalos o dominios definidos como intervalos** (como el caso ilustrado como ejemplo).
- c. **Problema de tipo ordinal**, es decir que el atributo no representa fielmente un valor ordinal. Casos usuales es cuando un atributo no es claro qué valor representa o simplemente no es evidente en cuál unidad está representada.
- d. **Problema de tipo nominal**, cuando el valor nominal de un atributo, como por ejemplo problemas con la legibilidad de los valores por sustitución de caracteres, por errores de captura, errores de traducción, etc.

Completitud

La completitud es un indicador cuán completa es la representación de un conjunto de datos con relación a la realidad. Así por ejemplo si un área urbana tiene 80 km², pero sólo hay 60 km² cartografiados a nivel de manzana, podemos decir que hay una subrepresentación de la realidad en un 25%.

También podemos encontrarnos con una sobrerrepresentación de la realidad. Es cuando un conjunto de datos posee datos redundantes que no aportan valor.

Uso, propósito y limitaciones

Debemos primeramente diferenciar entre uso y propósito. El propósito de un conjunto de datos se refiere a cuál es el uso para lo cual este fue creado. Por lo contrario, el uso es aquel al que está sometido. No necesariamente el propósito y uso son congruentes.

Veremos casos, por ejemplo, en las cartas temáticas del INEGI 1:250,000 ser empleadas en estudios a escalas 1:10,000 a 1:50,000. Esta es una incongruencia de uso y propósito porque uno es local y el otro es regional, conduciendo a problemas de interpretación e indeterminación porque la exactitud de uno y otro es inconsistente para ser empleados simultáneamente.

Es importante comprender que los conjuntos de datos de escalas pequeñas no deben ser empleadas con conjuntos de datos de escalas mayores.

Las limitaciones, según ISO 19115, se refiere a las restricciones de carácter legal, como por ejemplo derechos de autor, propiedad, etc.

Calidad temporal

La calidad temporal es un concepto ambiguo en el sentido de que en los estándares se refieren a este como un concepto monolítico. En realidad, es un conjunto de dos conceptos:

- a. **La consistencia temporal en los atributos.** Es decir, si los eventos caracterizados en un conjunto de datos son lógicamente consistentes.
- b. **A la vigencia y consistencia lógica de los aspectos temporales del linaje de los datos,** la frecuencia de los cambios, es decir si son datos estáticos (para un período dado), cuasi-dinámicos (sufren cambios con cierta frecuencia) o son dinámicos (dependen fuertemente del tiempo), fecha de creación de la data, etc.

Usualmente bajo el estándar ISO19115 se conviene a clasificar la validez temporal de los datos espaciales bajo tres valores: *out of date*, *valid* y *not yet valid*, es decir “fuera de fecha”, “válido” y “aún no válido”.

Resolución

La resolución espacial es la capacidad que tenemos de discernir lo más pequeño a partir de una porción de un dato (asumiendo que una imagen es una unidad, que un polígono también lo es). Así, si vemos una imagen y somos capaces de leer los letreros del ala de un avión, entonces lo más probable es que estamos en la presencia de una imagen con una resolución igual o menor a 30 cm, porque se necesitan al menos 3x3 píxeles para poder interpretar algo.

Usualmente la resolución es un dato conocido y se manifiesta explícitamente. También es cierto que usualmente se emplea en datos espaciales ráster, pero puede extenderse a los vectoriales. Así, el primer ejemplo de la cartografía catastral vectorial 1:1,000 que mencionamos en realidad posee una resolución de 10 cm, no porque no pudiera (por su proceso específico) de mayor exactitud (lo es, por cierto), sino porque la misma se define (por su escala) como una cartografía para diferenciar linderos de al menos 10 cm de ancho.

Proyecciones, sistemas de referencia y sus transformaciones

Coordenadas

Debemos distinguir en el mundo de los sistemas de información geográfica entre las coordenadas de visualización y las de almacenamiento de los datos, esto fundamentalmente en el caso de datos vectoriales. En el caso de la data ráster no siempre puede ocurrir porque la data de esta naturaleza se define a partir de una representación matricial.

Las coordenadas de visualización es la que podemos apreciar en los sistemas de información geográficas o simplemente en el despliegue de un mapa en una aplicación móvil o en un navegador web. Las coordenadas de almacenamiento son las coordenadas almacenadas en el repositorio, sea este un archivo, en un campo de una base datos o incluso como una relación de coordenadas ofrecida por algún otro medio.

Esta distinción es fundamental porque es muy importante en el proceso de control de la calidad entender la importancia de la separación entre la capa de presentación y la de los datos, es decir cómo se ven los datos (se aprecian sus coordenadas) y como se almacenan.

Para las actividades de creación y modificación de datos vectoriales, como, por ejemplo, el trazo de una polilínea es importante que ambos sean los mismos. Esto significa que ambos deben encontrarse en la misma proyección y marco de referencia geográfico. De lo contrario habrán, sin importar lo sofisticado que sea la solución de software una distorsión.

La distorsión por este tipo de incongruencia, es decir que se trace haciendo referencia a una coordenadas de un tipo y almacenándolas en otra se produce porque el programa, y específicamente la librería de transformación de coordenadas, debe realizar una operación que no necesariamente se encuentra libre de imprecisiones, y porque incluso el operador humano podrá no trazar lo que él cree que es, en cuanto a que las referencias de los objetos de referencia no tienen la forma ni las dimensiones que asume.

Veremos las coordenadas geográficas y las cartesianas para ilustrar los dos casos más empleados o comunes.

Coordenadas geográficas

Son coordenadas que se expresan valores angulares, sean grados (grados, minutos, segundos, o grados, minutos decimales, o grados decimales), en radianes o en *gadianes (GRAD)* o grados centesimales (basado en una circunferencia de 400 unidades en lugar de 360). Es común hoy día emplear lo que vulgarmente se denomina grado decimal, que es una deformación del grado sexagesimal donde los

minutos y segundos son transformados en decimales de grados. Su popularidad se debe a que es más comfortable para el usuario, pero no introduce ninguna otra ventaja.

Las coordenadas geográficas se expresan a partir de tres valores, dos angulares y uno decimal. Las angulares son la longitud y la latitud, la primera expresa el ángulo de giro desde el meridiano de Greenwich hacia el Este y el Oeste, donde los valores del primero son positivos y los del segundo negativos. Así se definen dos cuadrantes uno hacia el Este y otro hacia el Oeste del meridiano de Greenwich. Los valores van desde -180° a 180° . Las latitudes se definen a partir del ángulo formado por plano del ecuador hacia el norte y hacia el sur. Los del norte son representados por valores positivos y los del sur por valores negativos. Los valores van desde -90° a 90° .

Por convenio al valor de la longitud se representa por la letra griega lambda (λ) y la latitud por la letra phi (φ).

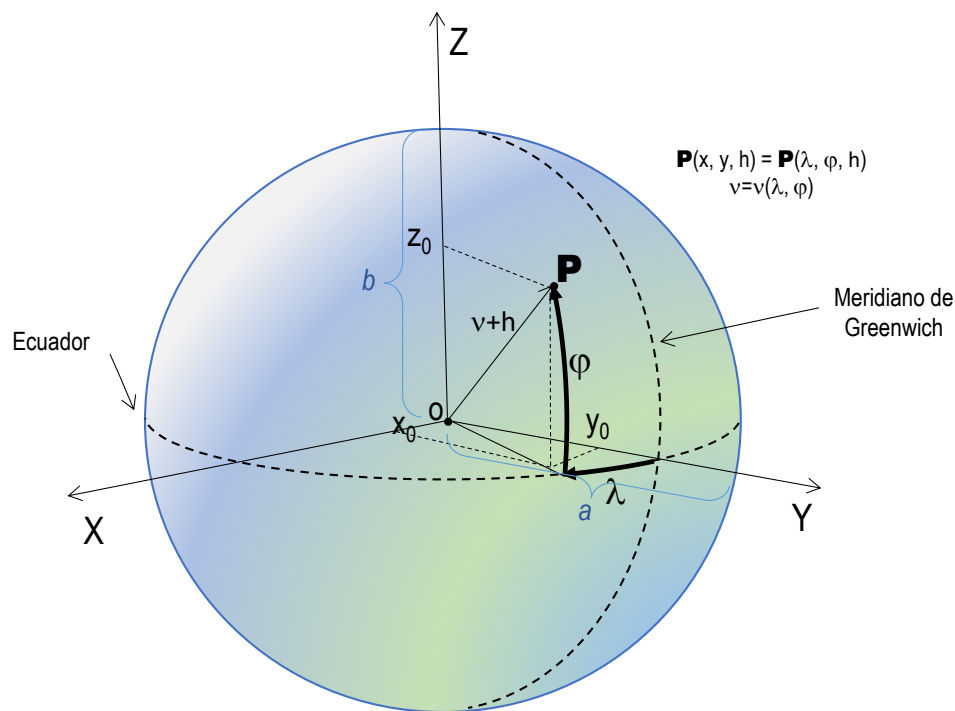


Ilustración 3. Elipsoide que representa a la Tierra. Podemos observar la forma en que un punto P sobre la superficie de este elipsoide de representa tanto en un marco de referencia ortogonal XYZ como en uno a partir de los ángulos λ , φ y v , conocidos como "coordenadas geográficas".

El tercer componente es la altura. Aunque podría ser el valor desde el centro geométrico del elipsoide hasta el punto sobre la superficie, no lo es. Se asume que el valor de este último componente, denominado altura, se define como la diferencia entre la distancia del punto al centro (representado usualmente por v y le distancia de este al elipsoide. Suele representarse por h y se expresa por convenio en metros (m).

Así, un punto sobre la superficie P se representa en coordenadas geográficas por la tripleta (λ, φ, h) y ubica de forma única a este.

Importante:

Deben considerar las unidades de los valores angulares de las coordenadas geográficas. Es importante saber, cuando aplican las fórmulas, cuál representación deben emplear, si grados-minutos-segundos (gg mm ss.sss), grados minutos con segundos como decimales (gg mm.dddd'), grados decimales (gg.ddddd), radianes o gradianes.

Para convertir los valores de uno a otro pueden emplear la siguiente equivalencia en las tres:

$$\frac{\alpha_{\text{grados}}}{180} = \frac{\alpha_{\text{radianes}}}{\pi} = \frac{\alpha_{\text{gradianes}}}{200}$$

Coordenadas cartesianas

Son las coordenadas que hemos empleado desde que desde la secundaria vemos el plano, la ecuación de la línea recta, las ecuaciones de segundo grado, etc. Se expresan por una tripleta, denominadas comúnmente (x, y, z), donde la abscisa es la x, la ordenada la y, y la altura es z.

Los espacios cartográficos que emplean este tipo de coordenadas se denominan proyecciones que se definen en espacios cartesianos.

Sistemas de referencia**Elipsoides**

El elipsoide es una representación matemática de la Tierra. No existe un elipsoide perfecto que represente exactamente a esta, pero gracias a las mediciones cada vez más precisas se han podido calcular elipsoides mejores cada vez. Sin embargo, todos los elipsoides se describen a partir de una elipse de revolución, con un semieje mayor (a) y uno menor (b), como podemos observar en la ilustración siguiente.

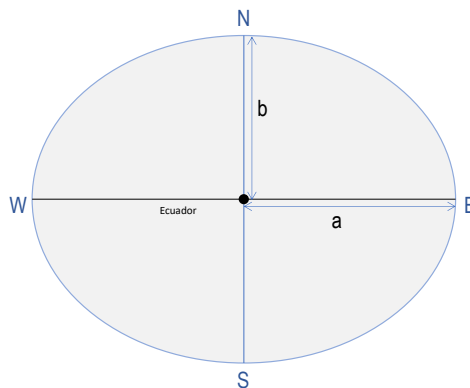


Ilustración 4. Sección de un elipsoide (elipse), donde podemos observar el semieje mayor (a) y el menor (b).

Los parámetros que describen a un elipsoide son fundamentalmente: la excentricidad (ϵ), achatamiento (f) y su inverso ($1/f$).

$$\epsilon = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (i)$$

$$f = \frac{a - b}{a} \quad (ii)$$

El achatamiento nos ofrece una idea de cuán lejos se encuentra la elipse (que define el elipsoide) de ser una circunferencia. Si $a=b$, entonces el achatamiento es cero, es decir no lo hay. Si $a \gg b$, entonces es más cercano a 1 y si a es cercano a b , entonces es menor a 1.

A continuación, mostramos la tabla con los valores de los elipsoides más comunes GRS80 y WGS84:

Elipsoide	Semieje mayor (a)	Semieje menor (b)	Achatamiento (f)	Inverso del achatamiento (1/f)
GRS80	6,378,137.00 m	6,356,752.314140 m	21,384.685860	298.2572221
WGS84	6,378,137.00 m	6,356,752.314245 m	21,384.685755	298.2572236

Podemos notar que la diferencia entre los semiejes menores de ambos es 0.0001050 m, lo que conduce a que a veces puede emplearse indistintamente.

Importante:

Como veremos en la sección de "Procesos ETL geográficos, las mejores práctica", es importante considerar el elipsoide correcto y en la medida de lo posible mantenerse en este para no introducir errores de exactitud posicional adicionales.

Datum

"Los elipsoides de referencia utilizados antes de los determinados por satélite están relacionados a un "punto inicial" de referencia en la superficie para producir un dato, el nombre dado a una superficie matemática lisa que se ajusta a la superficie media del nivel del mar en toda la zona de interés. Al "punto inicial" se le asigna una latitud, longitud, elevación sobre el elipsoide y acimut hasta algún punto. Una vez que un dato se adopta, proporciona la superficie a la que se realizan las mediciones de control. La latitud y longitud de todos los puntos de control en un área determinada se calcula en relación con el elipsoide y el "punto inicial" adoptados." (Snyder, 1987). Esta cita es muy ilustrativa porque deja patente que datum, significa efectivamente "dato" e inicialmente era un conjunto de puntos conocidos, medidos de forma meticulosa. Actualmente los satélites con mediciones repetitivas y precisas ofrecen referencias con mayor exactitud. Existen además las estaciones de referencia geodésicos que "miden" constantemente la posición y permiten obtener series en el tiempo que manifiestan los movimientos se la corteza terrestre.

Proyecciones cartográficas

Conceptos básicos

Las proyecciones tienen como base la teoría de funciones y el estudio de los espacios (la topología, pero no en su acepción empleada en los sistemas de información geográfica).

Supongamos que para un punto P , en un espacio S_1 existe una relación R que permite definir este punto en un espacio S_2 , que denominaremos P , tal y como se ilustra a continuación.

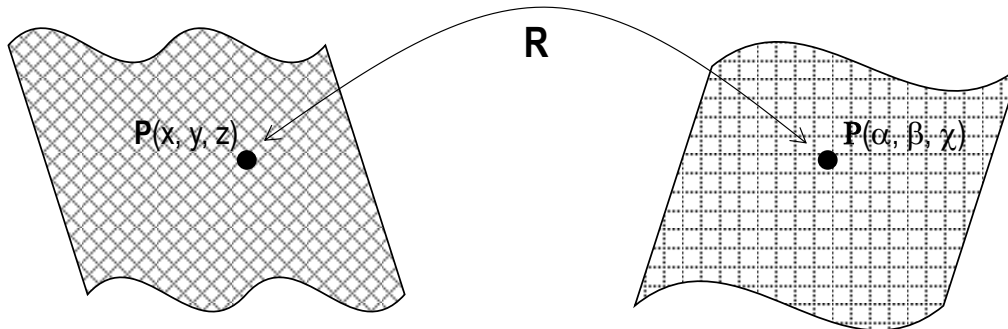


Ilustración 5. Muestra el proceso de representación de un punto entre dos espacios.

En el primer espacio (S_1), las variables (sólo ilustrativas) son x, y, z . Para el segundo (S_2) son α, β, γ . R es una relación (no definida aún), que permite “mapear” al punto en un espacio hacia el otro, y en viceversa.

La proyección de un objeto geométrico K de un espacio a otro, es un proceso similar, pero con algunas consideraciones importantes. Un punto en un espacio representa un punto en otro espacio, pero un segmento de recta no podemos asumir que la misma ecuación que la representa en un espacio es una aplicación automática en otro espacio.

Sistemas de coordenadas

Veamos primeramente el concepto de transformación de coordenadas, es decir la representación de objetos geométricos en sistemas de referencia distintos, pero conservando sus propiedades. Veamos el caso de la presentación de las coordenadas en un espacio cartesiano hacia uno polar y viceversa.

Las coordenadas cartesianas se pueden determinar a partir de las coordenadas polares mediante las siguientes ecuaciones:

$$x = X(r, \theta) = r \cos(\theta) \quad (iii)$$

$$y = Y(r, \theta) = r \operatorname{sen}(\theta) \quad (iv)$$

Donde $0 \leq \theta \leq 2\pi$

Para el caso inverso, el cual estamos ilustrando, sería:

$$\theta = \theta(x, y)^6 = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right), & x > 0 \wedge y \geq 0 \\ \frac{\pi}{2}, & x = 0 \wedge y > 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + \pi, & x < 0 \\ \frac{3\pi}{2}, & x = 0 \wedge y < 0 \\ \arctan\left(\frac{y}{x}\right) + 2\pi, & x > 0 \wedge y < 0 \end{cases} \quad (v)$$

$$r = R(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (vi)$$

Aunque existen restricciones para θ en su dominio para un intervalo $[0; 2\pi]$, pero son número reales.

A continuación, en la siguiente figura podemos apreciar cinco objetos (lugares) geométricos en un espacio en coordenadas polares.

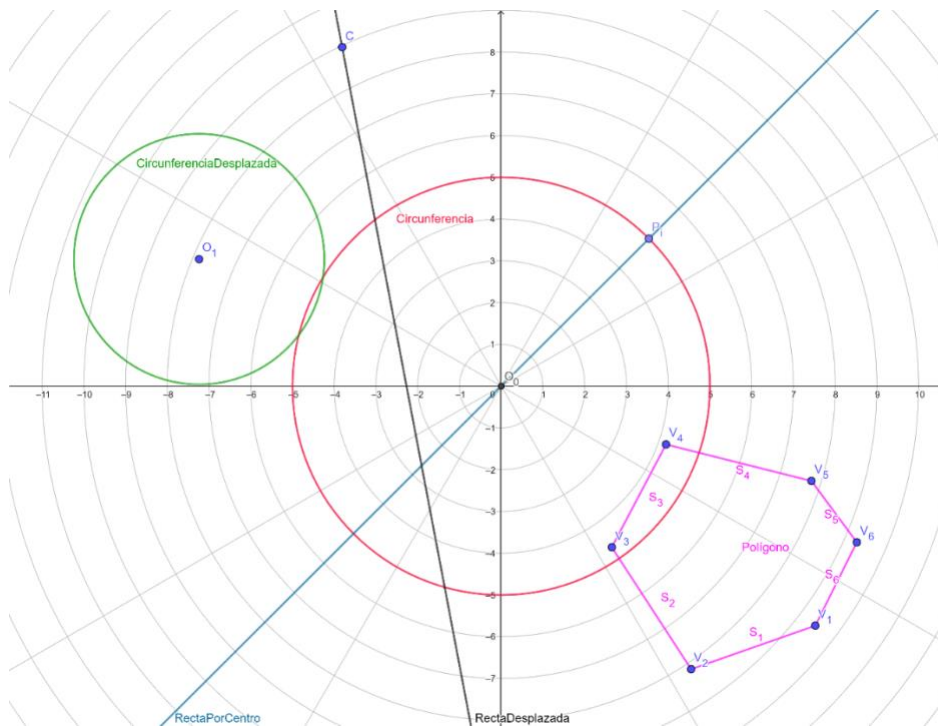


Ilustración 6. En un marco de referencia polar se muestran diferentes ejemplos de lugares y objetos geométricos.

Sean: *CircunferenciaDesplazada*, *Cd*, *Circunferencia*, *C*, *RectaPorCentro*, *R*, *RectaDesplazada*, *Rd* y *Polígono* *P*.

Entonces en coordenadas cartesianas para las primeras cuatro contamos con expresiones algebraicas polinómicas de primer y segundo grado:

⁶ La función arco cuya tangente es no es continua cuando $x=0$, por lo que se hace necesario definir por tramos o a pedazos la función $\theta = \theta(x, y)$.

Para Cd:

En coordenadas cartesianas:

$$Cd: (x + 7.24)^2 + (y - 3.04)^2 = 9; \quad x, y \in \mathbb{R} \quad (vii)$$

En coordenadas polares:

$$Cd: r^2 + \frac{r}{50}(724 \cos(\theta) - 302 \sin(\theta)) + 52.6592 = 0; \quad \theta \in [0; 2\pi] \subset \mathbb{R}; \quad r \in \mathbb{R}_+ \quad (viii)$$

Para C:

En coordenadas cartesianas:

$$C: x^2 + y^2 = 25 \quad (ix)$$

En coordenadas polares:

$$C: r^2 = 25; \quad \text{para todo } \theta \in [0; 2\pi] \subset \mathbb{R} \quad (x)$$

Para C:

En coordenadas cartesianas:

$$R: y = x \quad (xi)$$

En coordenadas polares:

$$R: \sin(\theta) - \cos(\theta) = 0; \quad \text{paracualquier valor } r \in \mathbb{R}; \quad \text{con } \theta \in [0; 2\pi] \subset \mathbb{R} \quad (xii)$$

Para Rd:

En coordenadas cartesianas:

$$Rd: y = 5.27x - 11.95 \quad (xiii)$$

En coordenadas polares:

$$Rd: r = \frac{1195}{(527 \cos(\theta) - 100 \sin(\theta))}; \quad \theta \in [0; 2\pi] \subset \mathbb{R} \quad \text{y } \theta < \arctan\left(\frac{527}{100}\right) \quad (xiv)$$

Para el polígono no contamos con este tipo de expresiones, pero se define mediante los vértices V_1, \dots, V_6 y los segmentos S_1, \dots, S_6 , a partir de los primeros.

Transformaciones

Solamente hemos visto como se representan los objetos o lugares geométricos en dos espacios con sistemas coordenados distintos. Veremos ahora qué sucede si hacemos que las transformaciones, uno que, por ejemplo, de un espacio **A** escale en una mitad las ordenadas en el espacio **B**, de la siguiente forma:

$$R: A \rightarrow B \left\{ z = x \wedge w = \frac{1}{2}y; x, y \in \mathbb{R} \right\} \quad (xv)$$

Así, por ejemplo, si tenemos la ecuación de una recta en el espacio A:

$$y = mx + p; m, p, x, y \in \mathbb{R} \quad (xvi)$$

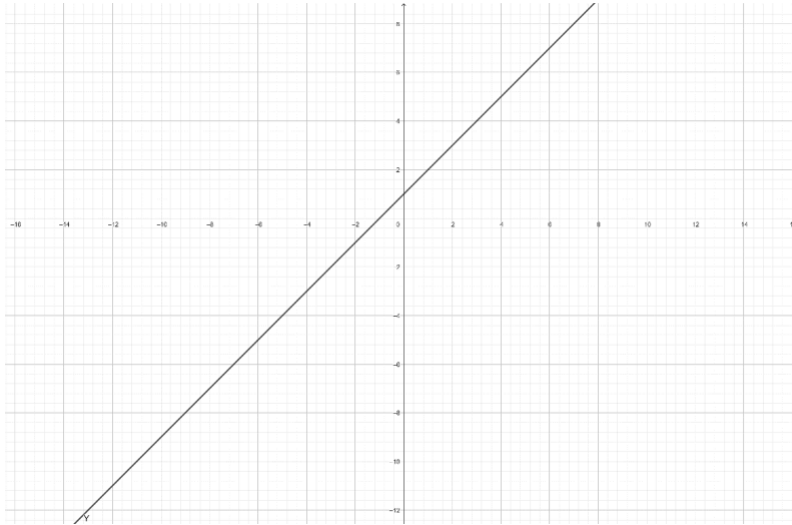


Ilustración 7. Representación de la ecuación (xiii).

La misma ecuación en el espacio B sería la siguiente:

$$w = \frac{m}{2}z + \frac{p}{2}; m, p, z, w \in \mathbb{R} \quad (xvii)$$

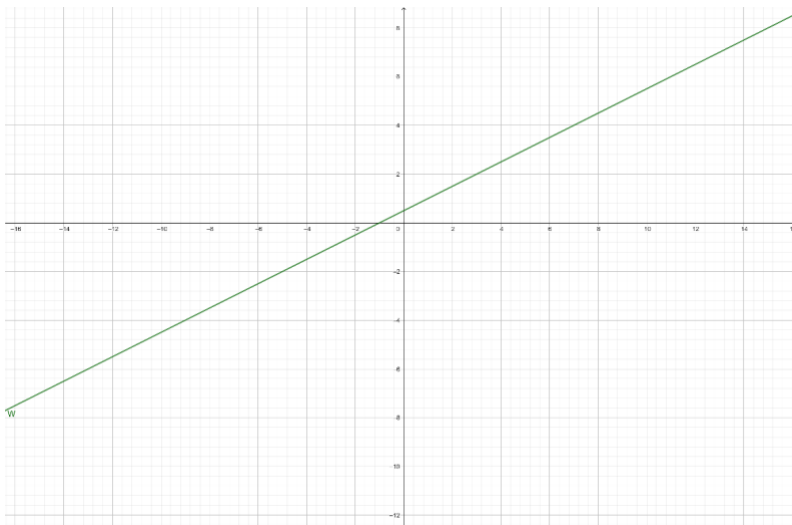


Ilustración 8. Representación de la ecuación (xiv).

Podemos observar que ambas curvas se diferencian en la pendiente, una es m y la otra es $m/2$, y en el punto de intersección con el eje de las ordenadas, donde una es p y otra es $p/2$. Ambas son las mismas rectas, pero representadas en dos espacios. Precisamente la proyección es la acción de representar un

objeto geométrico en un espacio determinado. El caso ilustrativo implicó solamente un cambio de escala en una de las variables, pero se pueden agregar transformaciones como rotaciones, traslaciones, etc.

Suele representarse de forma genérica a las transformaciones como:

$$V' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = f_e \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} = f_e \mathbf{R} V + \mathbf{T} \quad (xviii)$$

Donde \mathbf{R} es la matriz de rotación, \mathbf{T} la de traslación y f_e es el factor de escala (Deakin R. , 2006).

Podemos ilustrar un caso a través del siguiente ejemplo:

$$x' = \frac{3}{4}x + 4; x \in \mathbb{R} \quad (xix)$$

$$y' = \frac{9}{7}y + \frac{3}{5}; y \in \mathbb{R} \quad (xx)$$

Supongamos que tenemos los puntos: $A = (1, 1)$, $B = (4, 2)$ y $C = (3, -15/10)$ y definen un triángulo.

Apliquemos la transformación con las ecuaciones (xvi) y (xvii). $A_p = (19/4, 66/35)$, $B_p = (7, 111/35)$ y $C_p = (13/4, -93/70)$.

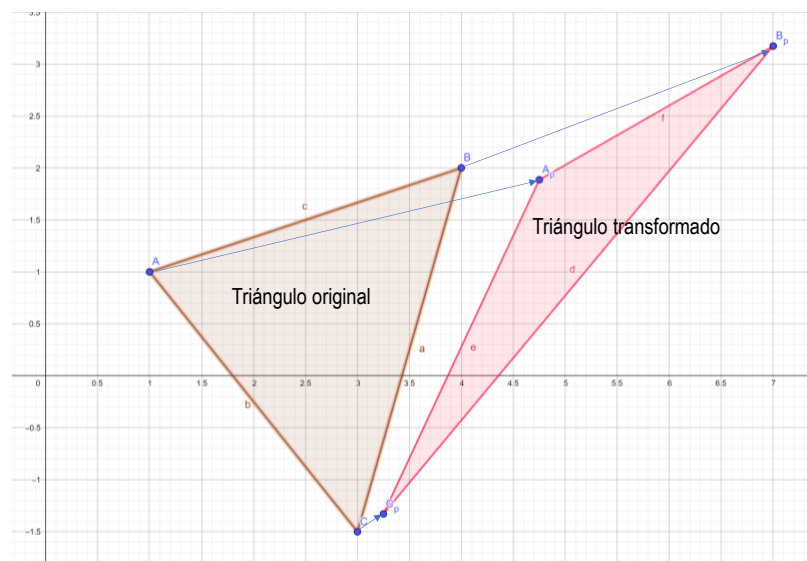


Ilustración 9. Ejemplo de la transformación de los tres vértices de un triángulo aplicando la transformación definida en las ecuaciones (xvi) y (xvii). Podemos apreciar que el triángulo transformado se ha deformado en el sentido tanto de rotación, de escala como de traslación, como su fuese “estirado y girado”.

Es evidente que el triángulo de la derecha que es resultado de la transformación posee dimensiones y forma diferentes, en ese caso decimos que no conserva ni los ángulos (forma) ni la dimensión. Veremos más adelante algunos efectos de aplicar transformaciones a los objetos geométricos porque nunca conservan todas sus propiedades.

Importante:

El concepto de transformación es crucial para comprender lo que sucede con los datos espaciales. La aplicación de transformaciones a los datos puede cambiar sustancialmente su aptitud para representar un rasgo geográfico o fenómeno por los cambios en su configuración geométrica que estos sufren.

Proyecciones

“Una proyección cartográfica es una representación sistemática de todo o parte de un cuerpo esférico, especialmente la Tierra, en un plano” (Snyder, 1987)⁷. Una proyección, es en efecto, una transformación, pero que se realiza desde una superficie que puede ser toda la Tierra o secciones de esta hacia un plano.

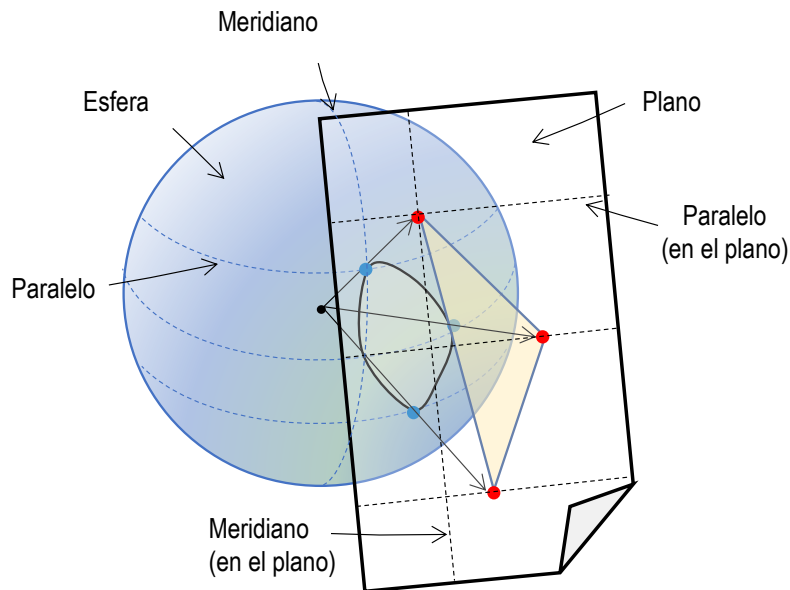


Ilustración 10. Podemos observar que la figura sobre la superficie esférica es proyectada sobre el plano. En la superficie esférica las aristas son curvas, pero en el plano son rectas. Esta es una proyección ilustrativa.

La geometría euclídea no puede emplearse sobre las superficies curvas. Una serie de matemáticos entre ellos Carl Friedrich Gauss (1777-1850), Nikolái Lobachevski (1792-1856), János Bolyai (1802-1860), Eugenio Beltrami (1835-1900) y Bernhard Riemann (1826-1866) definen una geometría que no asume al espacio como ortogonal y en ella los axiomas de Euclides no son aplicables, de forma parcial o total. La geometría que permite describir los objetos geométricos en superficies esféricas es “La geometría esférica”.

Escalas

Las proyecciones poseen distorsiones en cuanto a la escala. La escala que mide la relación entre el globo de referencia y el radio tierra se denomina escala principal o nominal. Consideremos que la Tierra no es una esfera, por lo que el radio de la Tierra es el valor de este en el punto tangente a la figura empleada para la proyección y el valor del semieje mayor del elipsoide que se emplea para modelarla.

⁷ Este libro es una extraordinaria herramienta para los especialistas en cartografía. Altamente recomendable.

$E_p = \frac{r}{R}$; donde r es el radio del globo de referencia y R es el radio de la Tierra (xxi)

La escala real es el cociente de la distancia en la carta plana entre la distancia en la superficie de la Tierra.

$E_r = \frac{d}{D}$; donde d es la distancia en el plano y D en la superficie la Tierra (xxii)

El factor de escala es el cociente de la escala real entre la escala nominal.

$F_e = \frac{E_r}{E_p}$; donde E_r es la escala real y E_p la escala nominal (xxiii)

En condiciones ideales el factor de escala es 1. Las proyecciones se diseñan para que las zonas relevantes tengan valores cercanos a este valor. Así por ejemplo para una proyección UTM, el valor en la zona cercana al meridiano central su valor es 0.9996 que es un valor conocido para aquellos que la han empleado.

Se denomina a k como la escala factor a lo largo de los paralelos y h a lo largo de los meridianos. Es una proyección UTM h es constante a lo largo del meridiano central ($h=k=0.9996$). k varía hacia cada lado, desde un valor ligeramente menor a 1, hasta uno aproximadamente 1 y finalmente hasta uno mayor a 1. Este último valor indica que la distorsión de la escala en los bordes de la zona es mayor y por lo tanto menos confiables los objetos representados en estas áreas. El factor de escala h , es constante en la dirección norte-sur (o sur-norte), por pedazo de tiras infinitesimales.

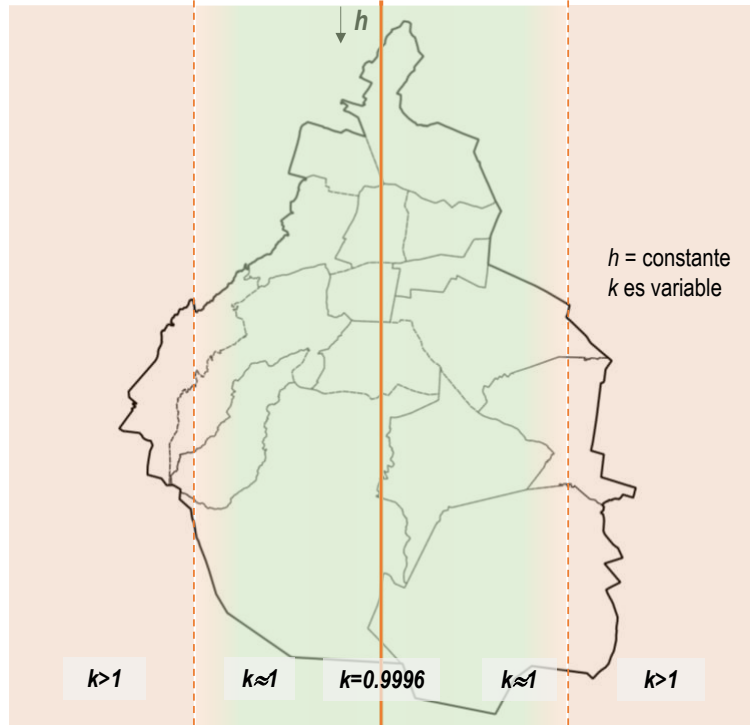


Ilustración 11. Ejemplo ilustrativo que asume que el meridiano central (naranja) y los dos meridianos (naranja punteados), marcan la zona de confianza de la proyección en cuanto a su factor de escala en el intervalo [0.9996, 1).

Clasificación de las proyecciones

Las proyecciones se pueden caracterizar en relación con las características relativas al área, la forma, la escala y la dirección.

- a. **Equivalentes o autálicas:** Las proyecciones que se diseñan para **conservar el área** al representar en el plano los rasgos se denominan “Proyecciones de Áreas-Igualas. Formas, ángulos, y la escala deben estar distorsionadas en la mayor parte de dicho mapa, pero normalmente hay algunas partes que están diseñadas para conservar estas características correctamente, o casi” (Snyder, 1987). Términos menos comunes utilizados para proyecciones de áreas iguales son equivalentes: proyecciones *homolográficas* o *autálicas*.
- b. **Conformes u ortomorfas:** Las proyecciones que **conservan en una buena medida la forma** de los rasgos en su representación proyectada se denominan conformes o también ortomórficas. Estas proyecciones usualmente conservan con bastante exactitud los ángulos relativos de los objetos, permitiendo que la “forma” de este se represente de forma “muy similar” a la realidad. Las proyecciones conformes cuando se emplean para proyectar, por ejemplo, a todo el planeta poseen algunas zonas singulares, donde la distorsión de la forma es evidente.
- c. **Equidistantes:** Las proyecciones no conservan la escala en toda su área de representación. Sin embargo, existen algunas de estas que conservan de forma bastante certero el factor de escala al verdadero en casi toda la superficie. Estas proyecciones se denominan equidistantes. Usualmente las escalas se conservan normalmente cercano a su valor nominal o escala verdadera (el mejor valor por supuesto 1), a lo largo de la longitud de origen cuando son estas son longitudinales y a lo largo del meridiano central cuando son transversales.
- d. **Azimutales:** Las proyecciones conformes conservan bastante bien los ángulos de forma local, pero no necesariamente estos representan rumbos verdaderos. Se denominan proyecciones azimutales a aquellas que conservan la dirección (ángulo) en forma congruente con los rumbos verdaderos. Son proyecciones se que pueden emplear para la navegación con mucha confianza por la certeza de que los rumbos que representa son muy cercanos a la realidad.
- e. **Afilácticas:** Son las proyecciones que no conservan ni las áreas, ni las direcciones, ni las formas (Salgado Don, 2015).

Existen proyecciones diseñadas especialmente para conservar específicamente algunas de las características importantes para usos específicos.

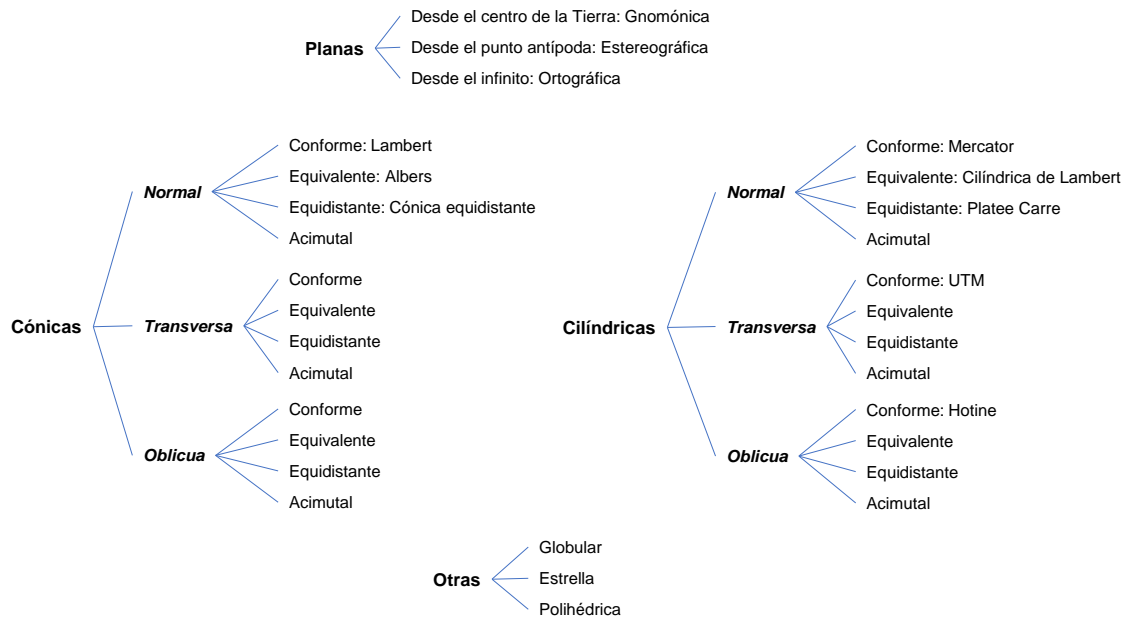


Ilustración 12. Cuadro sinóptico de la clasificación de las proyecciones.

Proyecciones cilíndricas

Regulares (Normal)

Básicamente una proyección cilíndrica regular (longitudinal) o simplemente cilíndrica, es aquella que se logra al “colocar” un cilindro alrededor de la Tierra (como se muestra en la siguiente ilustración), de forma tal que la parte tangencial del cilindro sobre el elipsoide logre un factor de escala 1. Algunos casos se hacen que sea secante para que este factor sea 1 en dos paralelas y cercano a uno (menor a este) entre ellas.

El caso más popular de la proyección cilíndrica es el de *Mercator* (Gerardus Mercator, 1512-1594, podemos observar su famoso Mapamundi). Mercator creó esta proyección bajo la idea de que las direcciones fuesen rumbos verdaderos, es decir que estos representasen la orientación correcta y que la distancias, en las zonas entre los paralelos 84° y 80° fuesen lo suficientemente buenos para lograr este cometido.

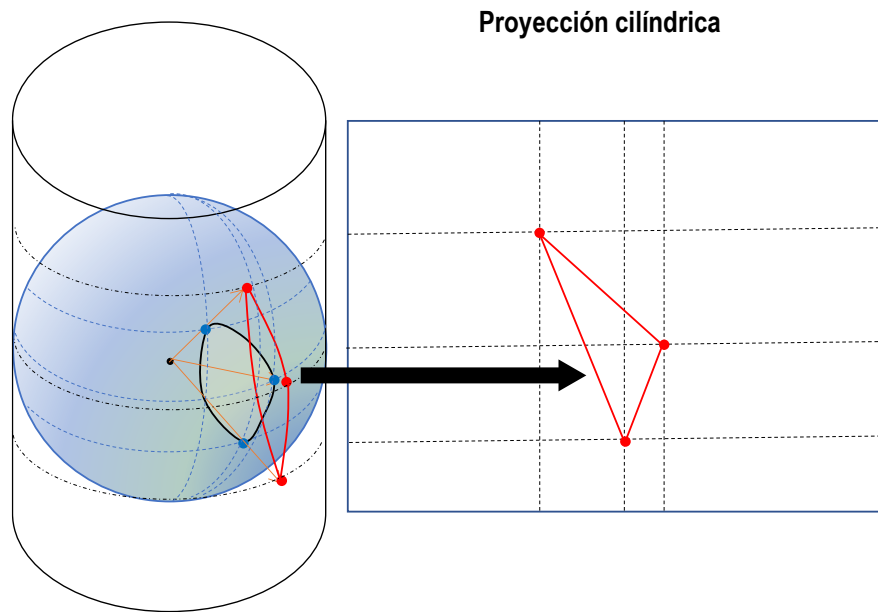


Ilustración 13. Esta es una ilustración de una proyección cilíndrica, donde se “proyecta” un triángulo en la superficie esférica hacia el plano, lográndose esto proyectando “rayos imaginarios” desde el centro hacia el cilindro, colocado tangente en su “ecuador”. Al abrir este cilindro, podemos apreciar la figura proyectada.

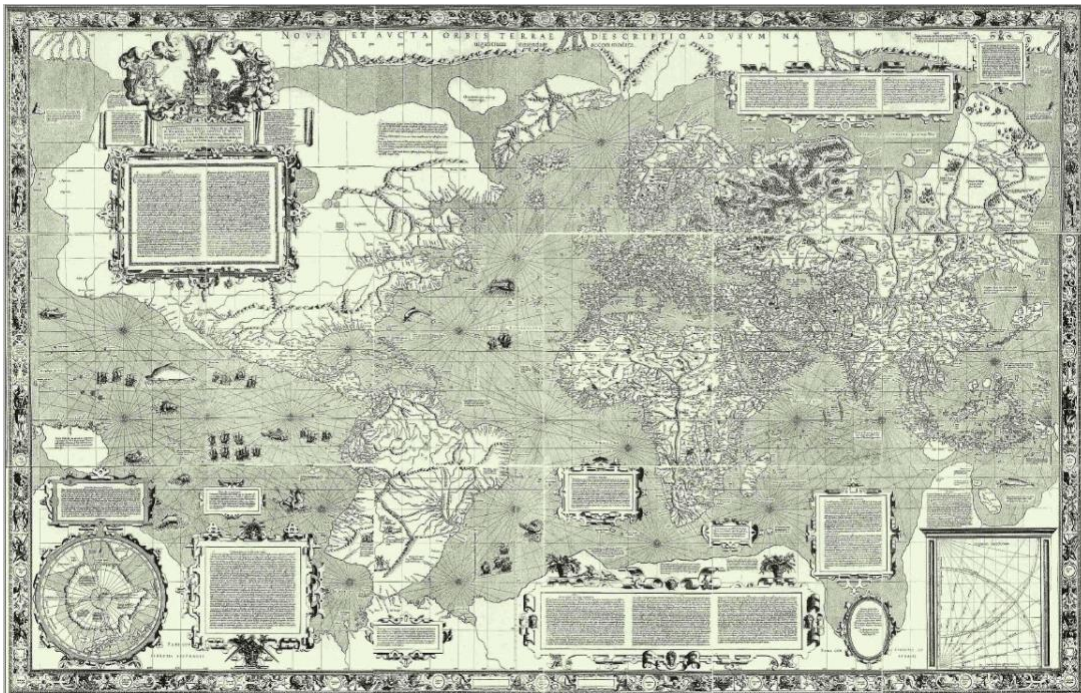


Ilustración 14. Mapamundi de Mercator “Nova et avcta orbis terrae descriptio ad usum navigativum emendate accomodata”, 1569. Es un ejemplo de un mapa en esta proyección, creado por él, donde la diferencia con los mapas en esta proyección contemporáneos a nosotros radica en la fuente de los datos. Es un detalle interesante que Mercator nunca dejó el continente europeo, elaboró sus mapas a partir de datos obtenido por exploradores y navegantes.

Para entender la proyección de Mercator debemos comprender algunos detalles significativos. Los valores de la longitud varían con respecto a la distancia desde el centro de masa de forma tal que se puede definir una dependencia funcional. Es decir:

$$v = v(\varphi); \text{ para } \varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \quad (xxiv)$$

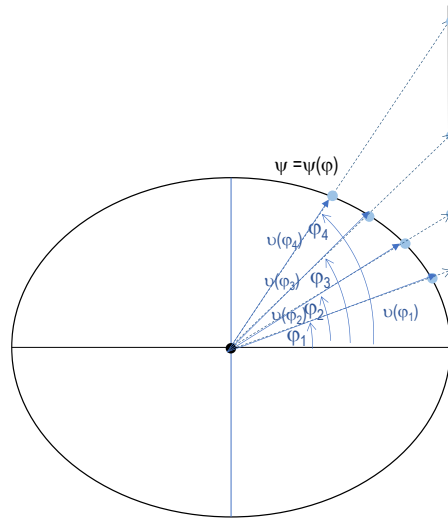


Ilustración 15. Vista de una sección del elipsoide (elipse) que muestra como los puntos en la superficie, se dispersan verticalmente con mayor pronunciamiento hacia los polos. Otro factor importante radica en la dependencia del radio v con el valor de φ , la latitud.

Este punto es crucial para comprender la razón por la que en las ecuaciones que definen la proyección los valores relativos a la variación vertical es mucho más compleja que la horizontal.

Ecuaciones para la transformación directa

Sean φ_p y λ_p la latitud y la longitud de un punto **P** cualquiera sobre la superficie terrestre.

Entonces primero calculamos el valor de ψ (Gómez Moreno, 2004):

$$\psi(\varphi_p) = \ln \left[\tan \left(\frac{\pi + 2\varphi_p}{4} \right) \left(\frac{1 - \varepsilon \operatorname{sen}(\varphi_p)}{1 + \varepsilon \operatorname{sen}(\varphi_p)} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \right]; \text{ con } \varphi_p \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \quad (xxv)$$

Donde ε es la excentricidad.

$\Delta\lambda$ es la diferencia entre meridiano central y la longitud del punto **P** expresados en radianes⁸.

$$\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_p; \text{ con } \lambda_p \in [-\pi; \pi] \quad (xxvi)$$

Siendo a el valor del semieje mayor, entonces los valores de x (algunas veces indicado por E) e y (algunas veces indicado como N) es:

$$x = a \Delta\lambda \quad (xxvii)$$

$$y = a \psi \quad (xxviii)$$

⁸ Es importante cambiar a radianes los valores.

Notemos que existe consistencia dimensional porque a es expresado con una unidad de longitud (**L**) y los otros son en este punto adimensionales.

Es importante observar que de la ecuación (xxv) podemos deducir que si la latitud del punto se acerca hacia los 90° entonces el valor de la tangente tiende a infinito. Es por ello por lo que la proyección tiene singularidades en valores cercanos a los polos y la deformación en la medida en que se acerca es estos es muy pronunciada.

Ecuaciones para la transformación inversa

Si tratasen despejar φ_p en la ecuación (xxv) llegarán a la conclusión que no encontrarán una solución algebraica explícita de este en función de ψ . Esto tiene una consecuencia importante, la solución o transformación inversas se tiene que definir como un proceso iterativo. Este proceso a su vez implica en que la transformación del espacio Mercator al Geográfico, introduce un error sistemático que impacta en la calidad posicional de los datos.

Expongamos el método de cálculo a continuación.

Sean x e y las coordenadas en el espacio Mercator de un punto **P**. Esto asumiendo un elipsoide con semieje mayor a y semieje menor b , y del espacio Mercator conocemos λ_0 , su meridiano central.

ψ se calcula mediante la siguiente ecuación, producto de despejarla en la ecuación (xxviii):

$$\psi = \frac{y}{a} \quad (xxix)$$

La longitud λ_p se calcula sustituyendo (xxvi) en (xxvii), para que pueda ser despejada la variable:

$$\lambda_p = \lambda_0 - \frac{x}{a} \quad (xxx)$$

El resultado es en radianes, deberá convertirse en grados.

φ_p debe calcularse en un proceso iterativo hasta que se cumpla la siguiente condición para los n ésimo y n ésimo menos uno valores de este y ξ es la precisión con la que se desea calcular:

$$|\varphi_n - \varphi_{n-1}| < \xi; \xi \in \mathbb{R}_+^* \quad (xxxi)$$

Los valores de φ_n se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi_n = 2 \arctan \left[e^{\psi} \left(\frac{1 + \varepsilon \sin(\varphi_{n-1})}{1 - \varepsilon \sin(\varphi_{n-1})} \right)^{\frac{\varepsilon}{2}} \right] - 90^\circ; \text{ con } \varphi_{n-1} \text{ en grados} \quad (xxxii)$$

Si asumimos que la primera iteración se realiza con $\varphi = 0^\circ$ entonces podemos ver que la ecuación queda para $n=0$:

$$\varphi_0 = (2 \arctan(e^\psi)) - 90^\circ \quad (xxxiii)$$

Esta ecuación es la primera que debe emplearse para calcular φ_0 y sustituirse en la ecuación (xxxii) y así obtener φ_1 , comprobar si la condición (xxxi) se cumple. De no de hacerlo, obtener φ_2 a partir de φ_1 , comprobar nuevamente, y así sucesivamente hasta que estemos conformes con el valor de φ (es decir la condición (xxxi)), que es el valor de φ_p .

Importante:

Notemos que es un proceso iterativo en el que debemos considerar nuestro valor de error. Si lo definimos como 0 existe el riesgo de que el proceso nunca concluya. Por lo tanto, el proceso inverso introduce un error del orden de ξ .

Transversales

La proyección Transversa de Mercator es una proyección que se obtiene a partir de un cilindro transversal a la tierra (como se aprecia en la ilustración siguiente):

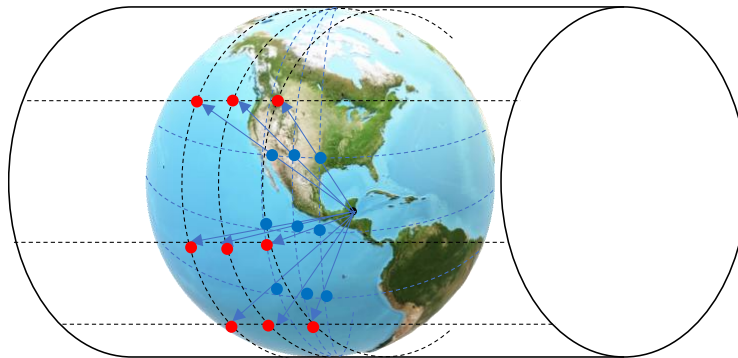


Ilustración 16. La proyección transversa de Mercator es una proyección transversa cilíndrica que asume que este se coloca de forma horizontal, donde el meridiano central es casi-tangente.

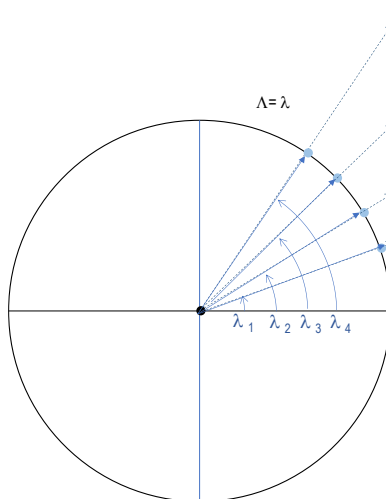


Ilustración 17. Esta es la vista superior (observamos el plano ecuatorial) donde se observa como las longitudes proyectadas en el plano del cilindro se dispersan en la medida en que se alejan del meridiano central.

El cálculo de una coordenada (φ_p, λ_p) se obtiene por un procedimiento (con ecuaciones específicas) donde debe tomarse en cuenta que la coordenada de la abscisa (x) no puede calcularse con una ecuación parecida a la (xxvii) porque la situación es similar a la que existe en la proyección Mercator para φ . En este caso es para ambas.

Ecuaciones para la transformación directa

Para el cálculo de la abscisa x, en el espacio cartográfico, es necesario realizar primeramente el cálculo del radio de curvatura R_c (Snyder, 1987):

$$R_c(\varphi) = R_c = \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \text{Sen}^2(\varphi)}} \quad (\text{xxxiv})$$

Donde a es el valor del semieje mayor, ε es la excentricidad, ambos para un elipsoide dato y φ es el valor de la latitud (φ_p) .

La abscisa se calcula mediante la ecuación (Gómez Moreno, 2004):

$$x = \Delta x + x_0 \quad (\text{xxxv})$$

Donde x_0 es el falso este y Δx es calculado mediante la ecuación siguiente:

$$\begin{aligned} \Delta x(\lambda_p, \varphi) = \Delta x = & R_c \lambda \cos(\varphi) + \frac{R_c \lambda^3 \cos^3(\varphi)}{6} (1 - t^2 + \eta^2) \\ & + \frac{R_c \lambda^5 \cos^5(\varphi)}{120} (5 + 18 t^2 + t^4 + 14 \eta^2 - 58 t^2 \eta^2 + 13 \eta^4 - 64 t^2 \eta^4 + 4 \eta^6 \\ & - 24 t^2 \eta^6) \\ & + \frac{R_c \lambda^7 \cos^7(\varphi)}{5040} (61 + 479 t^2 + 179 t^4 - t^6 + 331 \eta^2 - 3262 t^2 \eta^2 + 1771 t^4 \eta^2 \\ & + 715 \eta^4 - 8655 t^2 \eta^4 + 6080 t^4 \eta^4 + 769 \eta^6 - 10964 t^2 \eta^6 + 9480 t^4 \eta^6 + 412 \eta^8 \\ & - 6760 t^2 \eta^8 + 6912 t^4 \eta^8 + 88 \eta^{10} - 1632 t^2 \eta^{10} + 1920 t^4 \eta^{10}) + \dots \quad (\text{xxxvi}) \end{aligned}$$

Donde:

$$\Delta \lambda = \lambda = \lambda_0 - \lambda_p; \text{ en radianes } (\text{xxxvii})$$

La ordenada se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$y = \Delta y + S_\varphi + y_0 \quad (\text{xxxviii})$$

Donde S_φ es la distancia meridional (cuya ecuación se muestra más adelante), y_0 es el falso norte y Δy se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \Delta y (\lambda_p, \varphi) = \Delta y = & \frac{R_c \lambda^2 \operatorname{sen}(\varphi) \cos(\varphi)}{2} + \frac{R_c \lambda^4 \operatorname{sen}(\varphi) \cos(\varphi)}{24} (5 - t^2 + 9 \eta^2 + 4 \eta^4) \\ & + \frac{R_c \lambda^4 \operatorname{sen}(\varphi) \cos^7(\varphi)}{24} (1385 - 3111 t^2 + 543 t^4 - 129087 t^2 \eta^4 + 49644 t^4 \eta^4 \\ & + 56385 \eta^6 - 252084 t^2 \eta^6 + 121800 t^4 \eta^6 + 50856 \eta^8 - 263088 t^2 \eta^8 + 151872 t^4 \eta^8 \\ & + 24048 \eta^{10} - 140928 t^2 \eta^{10} + 94080 t^4 \eta^{10} + 4672 \eta^{12} - 30528 t^2 \eta^{12} \\ & + 23040 t^4 \eta^{12}) + \dots \quad (xxxix) \end{aligned}$$

Donde t, η y S_φ se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \sqrt{\varepsilon \cos^2(\varphi)} \quad (xli)$$

$$t = \sqrt{\tan^2(\varphi)} \quad (xlii)$$

$$S_\varphi = S(\varphi) = \left(A_0 \frac{a^2}{b} \varphi - (A_1 \operatorname{sen}(\varphi) \cos(\varphi) (1 + A_2 \operatorname{sen}^2(\varphi) + A_4 \operatorname{sen}^4(\varphi) + A_6 \operatorname{sen}^6(\varphi) + A_8 \operatorname{sen}^8(\varphi) + \dots)) \right) \quad (xliv)$$

Donde los coeficientes A_0, A_1, A_2, A_4, A_6 y A_8 se calculan mediante las siguientes fórmulas:

$$A_0 = 1 - \frac{3}{4} e^2 \left(1 - \frac{15}{16} e^2 \left(1 - \frac{35}{36} e^2 \left(1 - \frac{63}{64} e^2 \left(1 - \frac{99}{100} e^2 \right) \right) \right) \right) \quad (xlv)$$

$$A_1 = \frac{3}{4} e^2 \left(1 - \frac{25}{16} e^2 \left(1 - \frac{77}{60} e^2 \left(1 - \frac{837}{704} e^2 \left(1 - \frac{2123}{1860} e^2 \right) \right) \right) \right)$$

$$A_2 = \frac{5}{8} e^2 \left(1 - \frac{139}{144} e^2 \left(1 - \frac{1087}{1112} e^2 \left(1 - \frac{513427}{521760} e^2 \right) \right) \right)$$

$$A_4 = \frac{35}{72} e^4 \left(1 - \frac{125}{64} e^2 \left(1 - \frac{221069}{150000} e^2 \right) \right)$$

$$A_6 = \frac{105}{256} e^6 \left(1 - \frac{1179}{400} e^2 \right)$$

$$A_8 = \frac{231}{640} e^6$$

Donde e se calcula a partir de la excentricidad (ε) mediante:

$$e = \sqrt{\frac{\varepsilon^2}{1 - \varepsilon^2}} \quad (xlvi)$$

El factor de escala a su vez se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} k = 1 + & \frac{\lambda^2 \cos^2(\varphi)}{2} (1 + \eta^2) + \frac{\lambda^4 \cos^4(\varphi)}{24} (5 - 4t^2 + 12\eta^2 - 28t^2\eta^2 + 4\eta^6 - 48t^2\eta^4 - 24t^2\eta^6) \\ & + \frac{\lambda^6 \cos^6(\varphi)}{720} (61 - 148t^2 + 16t^4) + \dots \quad (xlvii) \end{aligned}$$

Es interesante notar que k siempre será igual o mayor a 1.

Ecuaciones para la transformación inversa

Para el cálculo de las coordenadas geográficas de un punto en un espacio Cilíndrico Transverso emplearemos el método propuesto en (Gómez Moreno, 2004):

Sea N_b el radio de curvatura del primer vertical y M el de la normal mayor, que se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$N(\varphi_b) = N = \frac{a}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \operatorname{sen}^2(\varphi_b)}} \quad (\text{xlvii})$$

$$M(\varphi_b) = M = \frac{a(1-\varepsilon^2)}{\sqrt{1-\varepsilon^2 \operatorname{sen}^2(\varphi_b)}} \quad (\text{xlviii})$$

Donde φ_b es la latitud base ("foot point latitude") que se calcula de la siguiente forma:

Primeramente, debemos emplear un método recurrente, donde cada φ_i se calcula hasta que se cumpla la condición (xvi) para ε generalmente un valor del orden de 1 mm. En ese caso se dice que $\varphi_n = \varphi_b$.

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \frac{b(x-x_0-S_{\varphi_{n-1}})}{A_0 a^2} \quad (\text{xlviii})$$

El primer valor de φ igual a 0, hace que podamos definir una fórmula más rápida para el cálculo de φ_0 :

$$\varphi_0 = \frac{b(x-x_0)}{A_0 a^2} \quad (\text{xlix})$$

Donde A_0 se calcula mediante la ecuación (xliii), a es el semieje mayor, b el semieje menor para el elipsoide dado, x es la abscisa de la coordenada proyectada y x_0 el falso este. $S_{\varphi_{n-1}}$ se calcula mediante la ecuación (xlii).

Posteriormente se deben calcular η y t , para $\varphi = \varphi_b$ mediante las ecuaciones (xl) y (xli).

La diferencia de longitudes $\Delta\lambda$ se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda = & \frac{x}{N \cos(\varphi)} - \frac{1}{6 \cos(\varphi)} \left(\frac{x}{N}\right)^3 (1 + t^2 + \eta^2) \\ & + \frac{1}{120 \cos(\varphi)} \left(\frac{x}{N}\right)^5 (5 + 6\eta^2 + 28t^2 - 3\eta^4 + 8t^2\eta^2 + 24t^4 - 4\eta^6 + 4t^2\eta^4 + 24t^2\eta^6) \\ & - \frac{1}{5040 \cos(\varphi)} \left(\frac{x}{N}\right)^7 (61 + 662t^2 + 1320t^4 + 720t^6 + 107\eta^2 + 43\eta^4 + 440t^2\eta^2 \\ & + 97\eta^6 - 234t^2\eta^2 + 188\eta^8 - 772t^2\eta^6 - 192t^4\eta^4 + 88\eta^{10} - 2392t^2\eta^8 + 408t^4\eta^6 \\ & + 1536t^4\eta^8 - 1632t^2\eta^{10} + 1920t^4\eta^{10}) + \dots \quad (l) \end{aligned}$$

La longitud en el punto **P** se calcula mediante la expresión:

$$\lambda_p = \lambda_0 - \Delta\lambda \quad (li)$$

La latitud del punto P , φ_p se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \varphi_p = \varphi_b - \frac{t x^2}{2 M N} + \frac{t x^4}{24 M N^3} (5 + 3t^2 + \eta^2 - 4\eta^4 - 9t^2\eta^2) \\ - \frac{t x^6}{720 M N^5} (61 + 90t^2 + 46\eta^2 + 45t^4 - 252t^2\eta^2 - 3\eta^4 + 100\eta^6 - 66t^2\eta^4 - 90t^4\eta^2 \\ + 88\eta^8 + 255t^4\eta^4 + 84t^2\eta^6 - 192t^2\eta^8) \\ + \frac{t x^8}{40320 M N^7} (1385 + 3633t^2 + 4095t^4 + 1575t^6) + \dots \quad (lii) \end{aligned}$$

El factor de escala se puede calcular empleando la siguiente expresión:

$$k = 1 + \left(\frac{x}{N}\right)^2 \frac{(1+\eta^2)}{2} + \left(\frac{x}{N}\right)^4 \frac{(1+6\eta^2+9\eta^4+4\eta^6-24t^2\eta^4-24t^2\eta^6)}{24} + \frac{1}{720} \left(\frac{x}{N}\right)^6 \quad (liii)$$

UTM

Es la proyección transversa cilíndrica de Mercator más empleada. Asume que son 60 zonas de 6° de separación, con meridianos inicial y final a 3° a la izquierda y a la derecha del meridiano central. Es una proyección secante. Esto significa que en vez de colocar el cilindro transverso tangente al Ecuador se coloca secante, permitiendo que el factor de escala central sea de 0.9996 y crece hacia los meridianos extremos, siendo mayor a 1 en la vecindad de estos y en los extremos exteriores.

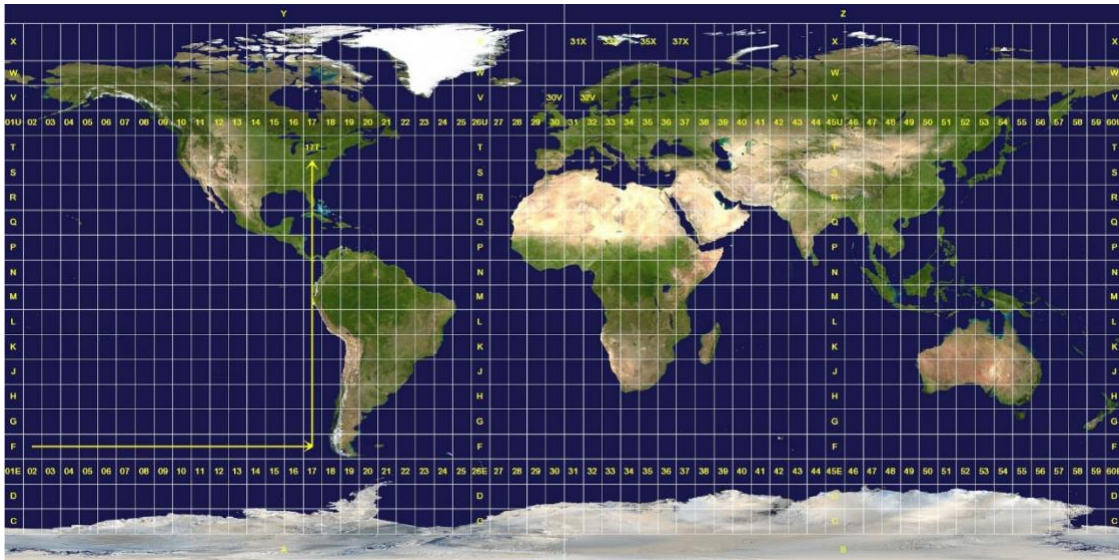


Ilustración 18. Mapa que muestra los husos (zonas) UTM.

Para nuestro país, las zonas UTM son del 11 al 16, donde el primero es válido para Baja California y el último para el extremo Este de la península de Yucatán.

UTM posee algunas características importantes que la hacen muy popular:

- a. Se definen 60 husos de 6° para toda la Tierra.

- b. Se emplea entre -80° al Sur y 80° al Norte. Notemos que en la ecuación (xli) si el valor de la latitud se acerca a los 90° (tanto al Norte como al Sur) tiende a valor muy grandes, hasta la indeterminación⁹.
- c. Las líneas secantes (*líneas automeicocas*) se sitúan a 2° y $15'$ del meridiano central con una escala nominal 1, creciente hacia el exterior de la banda y decreciente hacia el Meridiano Central con un valor de 0.9996.
- d. El valor del falso Este (x_0) es de 500,000 m.
- e. Para el hemisferio Sur se asume un falso Norte (y_0) de 10,000,000 m para evitar los valores negativos de las ordenadas.

UTM Modificada

La proyección Transversa Universal de Mercator Modificada, mejor conocido como UTM, es una proyección cilíndrica transversa de Mercator definida usualmente para lograr una alta precisión en zonas (franjas) definidas. No es estrictamente una proyección transversa cilíndrica de Mercator, sino que se aproxima a una proyección cónica equidistante (es una combinación en estricto sentido). Es una proyección secante porque el cilindro se coloca secante y no de forma tangencial.

Se define de la siguiente forma (Gómez Moreno, 2004):

- a. El área de estudio se divide en franjas de 3° en longitud, con un meridiano central a cada 1.5° .
- b. En el meridiano central, el valor del Falso Este se adopta de acuerdo con las necesidades, y generalmente es igual a 500,000 m.
- c. El factor de escala en el meridiano central adopta valores entre 1 y 0.9999, que depende de la precisión cartográfica deseada.
- d. El origen de las ordenadas es el Ecuador y el valor de la falsa ordenada es tal que siempre se obtengan valores positivos.
- e. Es una proyección cilíndrica transversa secante (si $k_0 < 1$) o tangente (si $k_0 = 1$).

Importante:

Las proyecciones cilíndricas poseen la limitación más importante en los valores extremos de la latitud cuando son longitudinales y en la longitud si son transversas. De ahí que en la proyección de Mercator (cilíndrica) empleada para representar a toda la superficie terrestre las deformaciones en los extremos de los hemisferios es enorme. En el caso de las transversas, su diseño es para resolver representaciones

⁹ $\lim_{\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}} \tan(\varphi) = \lim_{\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}} \frac{\text{sen}(\varphi)}{\text{cos}(\varphi)} = \infty$ es decir, no existe el límite o diverge.

conformes por "bandas" y, aun así, las latitudes extremas (mayores a 80 grados) producen representaciones ya con deformaciones no aceptables.

Proyecciones cónicas

Es una proyección que propone colocar un cono secante a dos paralelos (denominados paralelos estándar), con un meridiano central. Son proyecciones diseñadas para cubrir todo un hemisferio de la Tierra o zonas con orientación preferiblemente horizontal.

En (Snyder, 1987) página 97 segundo párrafo describe las principales características comunes a todas las proyecciones cónicas conformes:

"Las proyecciones cónicas normales se distinguen por el uso de arcos de concéntricos círculos para paralelos de latitud y radios rectos igualmente espaciados de estos círculos para meridianos. Los ángulos entre los meridianos del mapa son más pequeños que las diferencias reales de longitud. Los arcos circulares pueden o no ser igualmente espaciados, dependiendo de la proyección..."

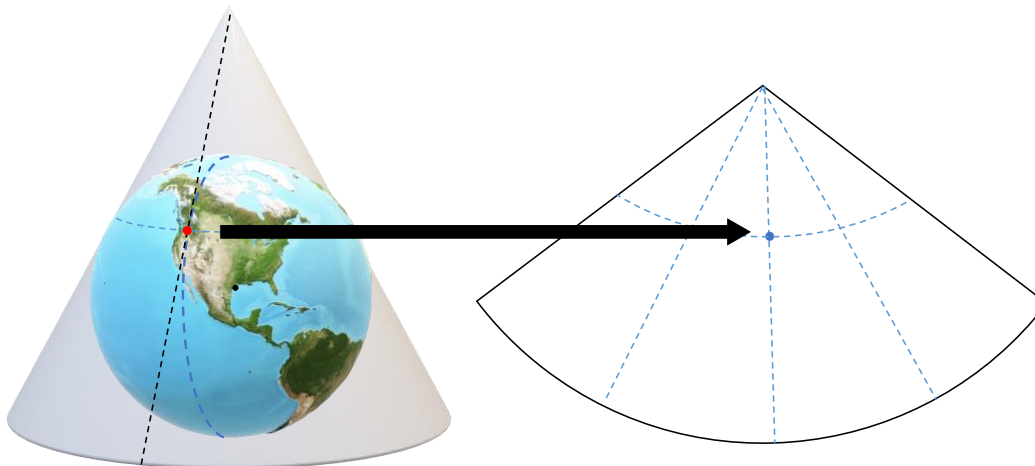


Ilustración 19. Las proyecciones cónicas se obtienen empleando un cono como espacio de proyección. Estos pueden ser tangentes o secantes.

Proyección Cónica Conforme de Lambert

Es una proyección que fue diseñada por Johann Heinrich Lambert en 1772 y que posee algunas características que le confieren mucha utilidad. El INEGI¹⁰ emplea esta proyección como espacio geométrico de representación y almacenamiento de los datos espaciales de nuestro país, en combinación con la UTM para zonas más pequeñas (i.e. cartas topográficas 1:50,000).

¹⁰ La proyección del INEGI Cónica Conforme de Lambert se define a partir de dos paralelos estándar (17.5 grados y 29.5 grados) y un meridiano central (-102.0 grados), con un falso este de 2,500 km. Para el marco de referencia ITRF2008 Época 2010 pueden emplear el código EPSG 6372 o simplemente definirlo en la plataforma de trabajo que emplean a partir del WKT OGC o ESRI, o Proj.4.

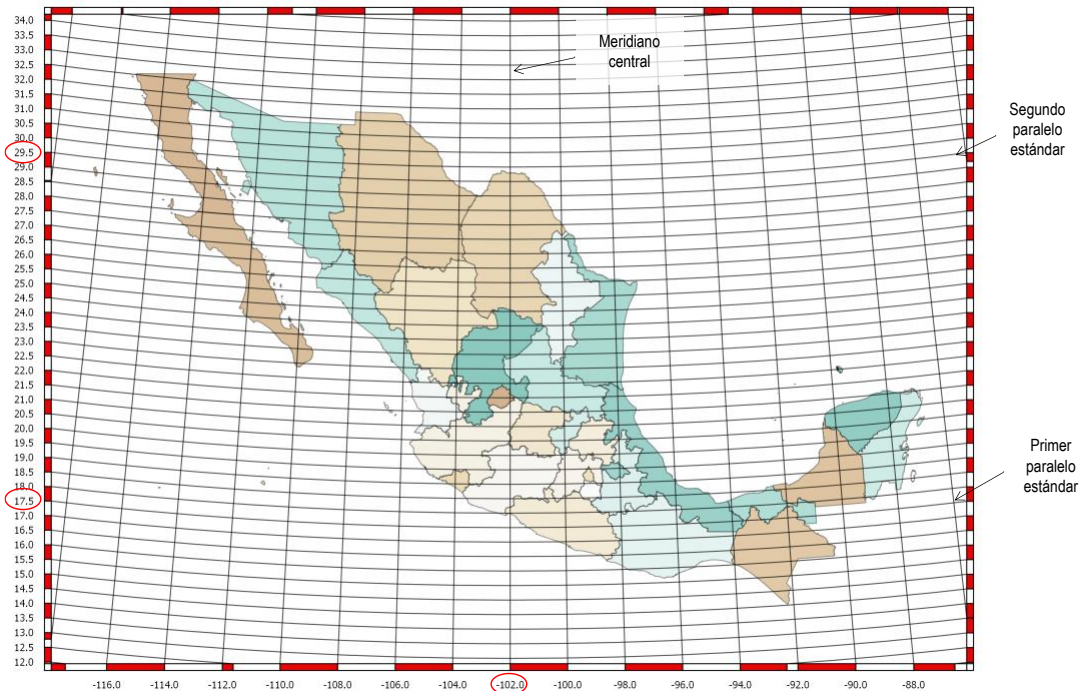


Ilustración 20. Este es un ejemplo de la proyección Cónica Conforme de Lambert para México (EPSG 6372), donde el meridiano central de ubica en -102.5 grados, los paralelos estándares son 17.5 y 29.5 grados. Con un falso Este de $2,500,000$ m. El elipsoide de referencia es el GRS80.

Esta proyección Cónica Conforme de Lambert (CCL) posee las siguientes características importantes que la convierten en una opción ampliamente empleada, sobre todo para zonas con orientación horizontal, donde las proyecciones cilíndricas transversas UTM no son convenientes:

- El factor de escala es constante en los paralelos base, decreciendo en el área que está comprendida entre éstos y aumentando al alejarse de ellos.
- Los paralelos son círculos concéntricos, espaciados de manera tal que la distancia entre éstos es menor al centro del mapa.
- Los meridianos son radios de los círculos anteriores, y cortan a los paralelos en ángulo recto.
- Es una proyección cónica secante normal.
- Por sus características, su uso es adecuado para la representación de áreas que se extienden de Este a Oeste con poca variación en latitud.

Ecuaciones para la transformación directa

Para el cálculo de las coordenadas cartográficas de un punto $P(\lambda_p, \varphi_p)$, en el espacio cónico de Lambert, es necesario considerar dos procesos enlazados (Gómez Moreno, 2004):

- Calcular las constantes del cono, empleando como argumentos los valores de los paralelos base o estándar.

- ii. Calcular las coordenadas cartográficas, abscisa y ordenada, tomando en consideración las coordenadas geográficas y las constantes calculadas.

Para calcular los parámetros necesarios se deberá emplear las siguientes ecuaciones:

$$m_i = \frac{\cos(\varphi_i)}{\sqrt{1 - \varepsilon^2 \operatorname{sen}^2(\varphi_i)}} \quad (liv)$$

Donde i , es un subíndice para denominar si el parámetro es para una φ_i .

$$t_i = \frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_i}{2}\right)}{\left[\frac{1 - \varepsilon \operatorname{sen}(\varphi_i)}{1 + \varepsilon \operatorname{sen}(\varphi_i)}\right]^{\frac{\varepsilon}{2}}} \quad (lv)$$

$$\eta = \frac{\ln\left(\frac{m_{sur}}{m_{norte}}\right)}{\ln\left(\frac{t_{sur}}{t_{norte}}\right)} \quad (lvi)$$

Donde $i=sur$ e $i=norte$, indica que son para los paralelos estándar (base) sur y norte, respectivamente.

$$\rho_p = \frac{a m_{sur} t_p^\eta}{\eta t_{sur}^\eta} \quad (lvii)$$

Donde $i=p$, indica que es el valor del parámetro t para φ_p .

La convergencia en el punto **P**:

$$\gamma_p = \eta (\lambda_0 - \lambda_p) \quad (lviii)$$

El factor de escala en el punto **P**:

$$k_p = \frac{m_{sur} t_p^\eta}{m_p t_{sur}^\eta} \quad (lix)$$

Donde m_p es el valor de m calculado para φ_p .

Las coordenadas, valores de x e y se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$x_p = x_0 + \rho_p \operatorname{sen}(\gamma_p) \quad (lx)$$

$$y_p = y_0 + \rho_0 + \rho_p \cos(\gamma_p) \quad (lxi)$$

Donde x_0 e y_0 son el falso Este y Norte respectivamente.

Ecuaciones para la transformación inversa

Para el proceso inverso, es decir calcular las coordenadas geográficas de un punto **P** (x_p, y_p) debemos, con el proceso directo, calcular algunos parámetros:

$$\rho_j = \sqrt{(x_j - x_0)^2 + (\rho_0 + y_0 - y_j)^2} \quad (lxii)$$

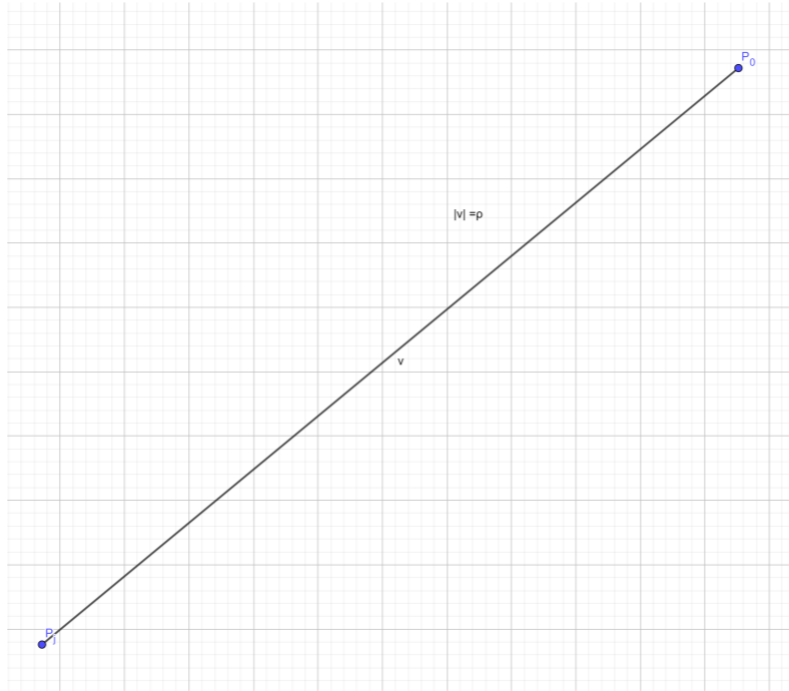


Ilustración 21. ρ es la norma de un "vector" (la distancia) que se define entre el punto P_1 y un punto definido a partir de los falsos Este y Norte.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{x_p - x_0}{\rho_0 + x_0 - x}\right) \quad (\text{lxiii})$$

Empleando la ecuación (li) se calcula t_{sur} y la ecuación (l) para calcular m_{sur} , para definir la siguiente ecuación:

$$t_p = t_{sur} \left(\frac{\eta \rho_p}{a m_{sur}}\right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (\text{lxiv})$$

La latitud φ_p se calcula a partir de un proceso iterativo. Se define una precisión, que denominaremos ξ , entonces deberá cumplirse la siguiente condición:

$$|\varphi_n - \varphi_{n-1}| < \xi; \quad \text{para } n \in \mathbb{N} \text{ y } \xi \in \mathbb{R}_+^* \quad (\text{lxvi})$$

Se calcula el valor inicial empleando una versión simplificada de (lxviii), cuando $\varphi_i = 0$.

$$\varphi_0 = 90^\circ - 2 \arctan(t); \quad \text{equivalente a si } \varphi = 0^\circ \quad (\text{lxvii})$$

La siguiente ecuación debe iterarse hasta que se cumpla la condición (lxvi) y así obtener la latitud:

$$\varphi_i = 90^\circ - 2 \arctan\left[t \left(\frac{1 - \varepsilon \operatorname{sen}(\varphi_i)}{1 + \varepsilon \operatorname{sen}(\varphi_i)}\right)^{\frac{\varepsilon}{2}}\right] \quad (\text{lxviii})$$

Por su parte la longitud se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\lambda = \lambda_0 - \frac{\gamma}{\eta} \quad (\text{lxvix})$$

Por su parte se calcula el factor de escala de la siguiente forma:

$$k = \frac{m_{sur} \epsilon_p^n}{m_p \epsilon_{sur}^n} \quad (lxx)$$

Consideraciones importantes sobre las proyecciones

Las proyecciones no son procesos carentes de errores en su exactitud. Estos proceden, como se ha apreciado a que algunas de ellas (la mayor parte inversas) cuentan con procesos iterativos y otros emplean expresiones que deben truncarse en algún momento. Aun cuando estas expresiones en su parte truncada tienden a ser muy pequeñas, no son iguales a cero.

- a. La selección de una proyección para el almacenamiento de los objetos debe seleccionarse con cuidado, consientes del error de exactitud que se introduce. En un proceso fotogramétrico suele seleccionarse en UTM porque para los modelos estereoscópicos que se encuentren entre los meridianos que definen la secante el factor de escala es cercano a 1 y por lo tanto el espacio proyectado es “cuasi-cartesiano”. Esto permite, con buena aproximación, asumir que es un espacio plano de la Tierra y el proceso de captura es “nativo”.
- b. La transformación entre dos espacios proyectados suele realizarse a través de una transformación inversa hacia el espacio geográfico y de allí a la proyección destino. Este es un proceso que introduce la mayor incertidumbre posible a las componentes de las latitudes.
- c. Debe siempre emplearse librerías de conversión de las cuales se conoce los algoritmos o que estén debidamente documentadas.
- d. Cuando en un GIS observamos que el mapa se encuentra en “geográficas”, lo que realmente significa es que las coordenadas se leen en ese sistema, pero el mapa se encuentra proyectado. La razón evidente, es la representación de toda o una porción de la superficie de la Tierra en un plano. La famosa Web Mercator, es exactamente lo que dice, una cilíndrica de Mercator.
- e. Los datos ráster son aquellos que cuentan con la menor flexibilidad para ser sometidos a procesos de cambios de proyección. Son matrices que asumen que cada celda representa una porción de la superficie terrestre, por lo que al deformarse se deformará la forma en la que esta “cubre” el área y ya no corresponderá a una representación fiable. Las celdas (pixeles) no son representaciones “adimensionales” sino unidades dimensionales concretas.

Transformaciones geográficas

El proceso de corresponder un objeto representado en una proyección determinada o simplemente una posición sobre la Tierra, referido a un marco de referencia hacia otro es lo que llamamos transformación geográfica.

Las transformaciones geográficas se sustentan en el principio de que la Tierra se representa a partir de un elipsoide y que existe un conjunto de datos (puntos) obtenidos directamente por medios astronómicos, estaciones de referencia GNSS, los satélites de posicionamiento u otro, que son conocidos y debidamente reconocibles o identificables. A ese conjunto de datos se le denomina DATUM (palabra latina que significa presente, regalo, lo que es dado, que a su vez se derivó en dato, aquello que es dado, es decir dato).

Las transformaciones DATUM/Elipsoide no son procesos sin errores, todo lo contrario. Por ello debe comprenderse bien en qué consiste el proceso de transformación. En las siguientes ilustraciones se muestran conjuntos de puntos, en azul y rojo, que hacen referencia a los mismos puntos, pero en diferentes sistemas que hacen referencia a un DATUM/Elipsoide, es decir en diferentes marcos geográficos o sistemas de referencia geográficos. Cuando hablamos, con todo rigor, de un punto P de coordenadas geográficas (λ, φ, h) deberíamos decir que lo son en referencia a un marco de referencia geográfico determinado, lo mismo si este punto estuviese representado en una proyección cartográfica determinada con coordenadas (x, y, h) .

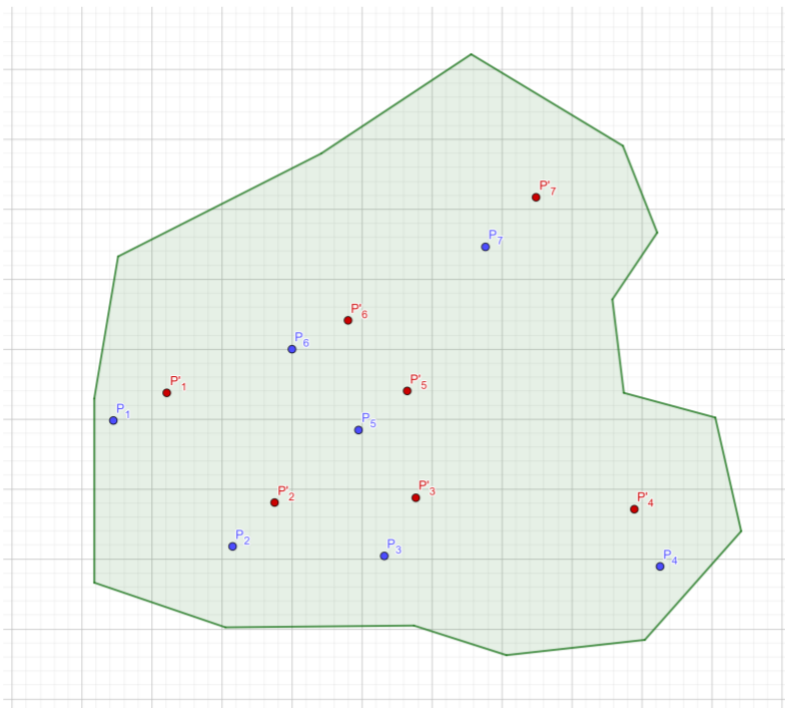


Ilustración 22. Los puntos azules representan una serie de puntos en un sistema DATUM/Elipsoide. Los puntos rojos son los mismos puntos, pero referentes a otro sistema DATUM/Elipsoide.

Existen varios tipos o métodos de transformación, algunos son analíticos, es decir se definen a partir de ecuaciones definidas y simplemente se calculan los valores, otros emplean rejillas o retículas calculadas en dos sistemas de referencia geográfica y se establece una correspondencia en ellos, otros emplean la regresión lineal, un método estadístico, y otros emplean una representación geocéntrica como paso intermedio.

Los métodos analíticos, como los Molodensky, Molodensky-Badekas y Helmert, con tres, cinco, siete o catorce parámetros (Foster & Mullaney, 2009), son empleados comúnmente (la ecuación (xviii) ilustra la forma típica de una expresión de transformación). La más popular de este tipo es la Molodensky-Badekas, que tiene tres subtipos, el simplificado con tres parámetros, la de cinco parámetros y la de siete parámetros.

Para comprender sus diferencias se debe entender que las transformaciones implican tres tipos básicos de acciones: la traslación (δx , δy , δz), la rotación (ε_x , ε_y , ε_z) y el escalado δs . La transformación Molodensky-Badekas emplea estos parámetros, pero la transformación Molodensky (clásico) emplea la traslación y emplea dos parámetros para describir la rotación y el escalado, a partir de la variación del semieje mayor δa y la variación del achatamiento δf .

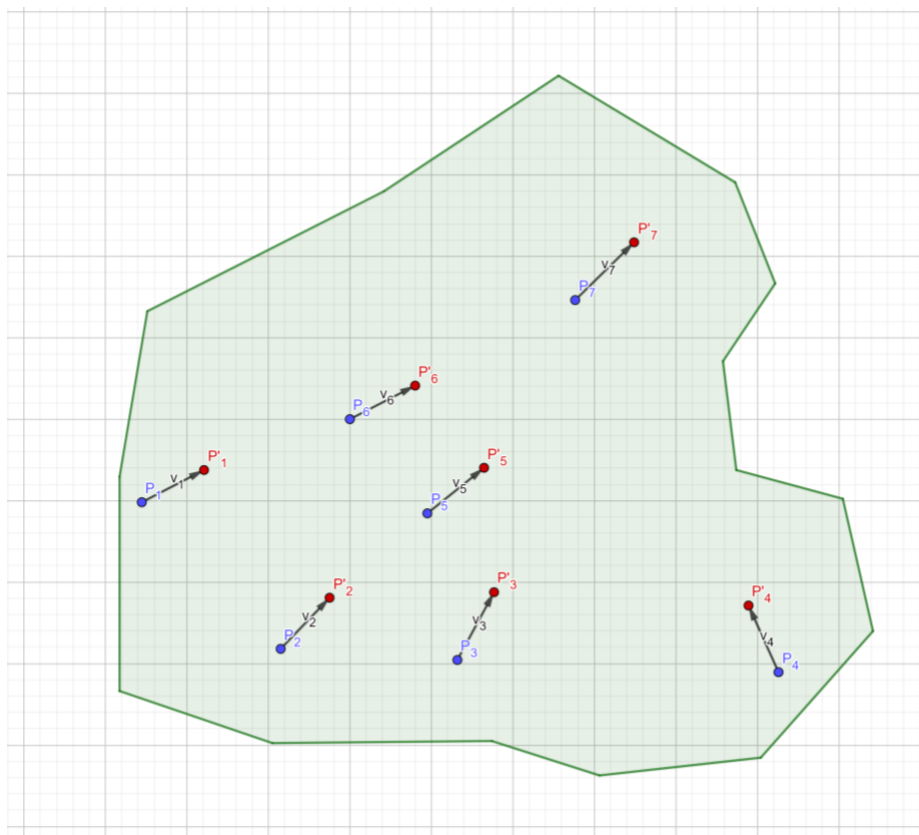


Ilustración 23. En esta ilustración podemos apreciar los vectores que indican la dirección y magnitud de estas diferencias.

En la siguiente ilustración podemos apreciar algunas transformaciones y en qué contexto se suelen emplear:

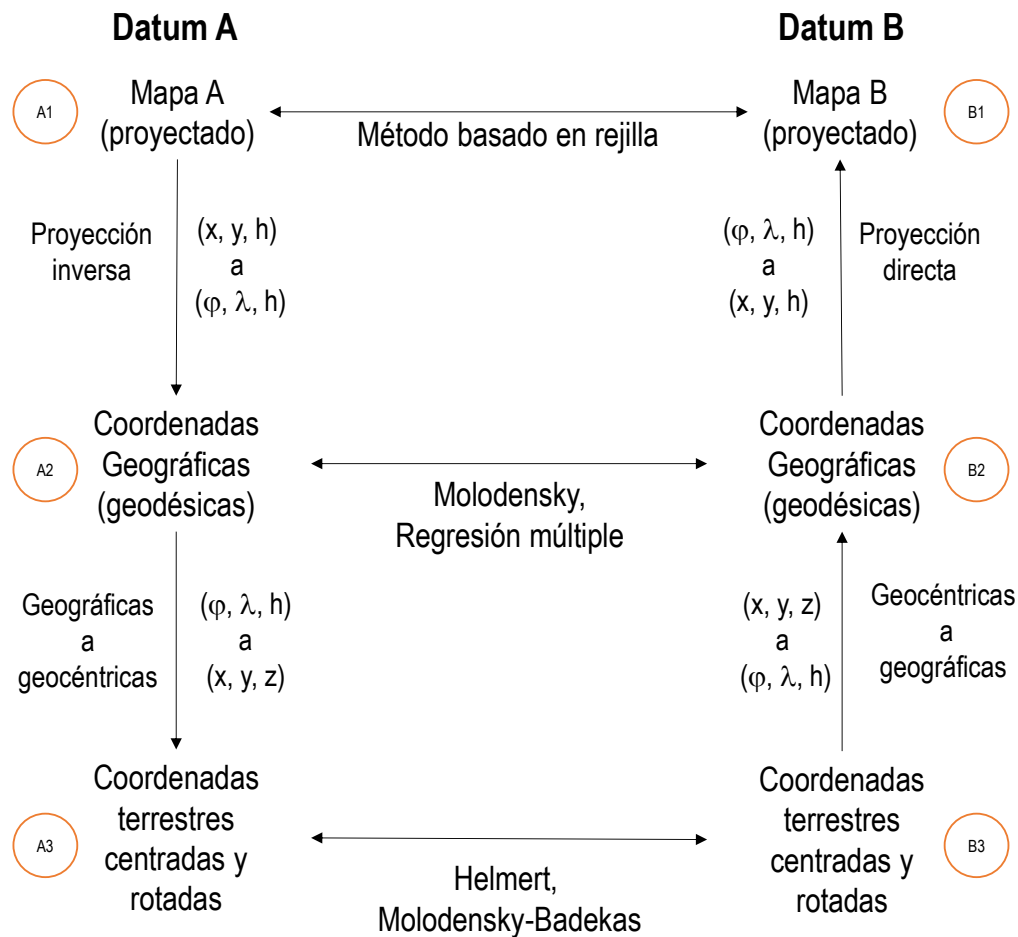


Ilustración 24. Algunas transformaciones y el contexto de su empleo.

Podemos observar que la ilustración los “caminos” para llegar de un escenario a otro. Así, por ejemplo, si deseamos realizar una transformación con un cambio de proyección de A1 a B3, veremos que se establecen varios posibles caminos (“paths”) $C_1 = \{A1, A2, B2, B3\}$ o $C_2 = \{A1, B1, B2, B3\}$ o $C_3 = \{A1, A2, A3, B3\}$ y todos pueden introducir errores o incertidumbre.

Existen métodos que consideran la velocidad o el tiempo como parámetro de conversión. Estos métodos, como el CVG (“Canadian Velocity Grid”), se basan en datos precisos sobre los movimientos de la corteza terrestre.

“La Tierra cambia de forma constantemente. Para entenderse en el contexto, cuando se observa el movimiento de la corteza terrestre se debe hacer referencia a ella. Un marco de referencia terrestre proporciona un conjunto de coordenadas de algunos puntos ubicados en la superficie de la Tierra. Pueden usarse para medir las placas tectónicas, las subsidencias regionales o usarse para representar la Tierra al medir su rotación en el espacio.” (fuente: <http://itrf.ensg.ign.fr/general.php>)

El marco de referencia ITRF que se define en México, i.e. ITRF 2008 época 2010, es un sistema en cierto sentido “cuasi-dinámico”, porque considera las velocidades de desplazamiento, o mejor dicho es un

“snapshot”, es decir una instantánea (de las lecturas) tomada en el año 2010. Para efectos prácticos el DATUM de este marco de referencia sólo se define a partir del elipsoide (GRS80).

```
PROJCS["unnamed",GEOGCS["GRS 1980(IUGG,
1980)",DATUM["unknown",SPHEROID["GRS80",6378137.298,257222101],TOWGS84[0,0,0,0,0,0,0]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["degree",0.0
174532925199433]],PROJECTION["Lambert_Conformal_Conic_2SP"],PARAMETER["standard_parallel_1",17.5],PARAMETER["standard_parallel_2",29.5],PARAMETER["latitude_of_origin",12],PARAMETER["central_meridian",-
102],PARAMETER["false_easting",2500000],PARAMETER["false_northing",0],UNIT["Meter",1],AUTHORITY["epsg",6372"]]
```

Ilustración 25. Definición OGC WKT de la proyección Cónica Conforme de Lambert definida por el INEGI (EPSG 6372). Notemos que en DATUM el valor es “unknown” (desconocido) y se define el esferoide (elipsoide). Fuente: <https://epsg.io/6372>.

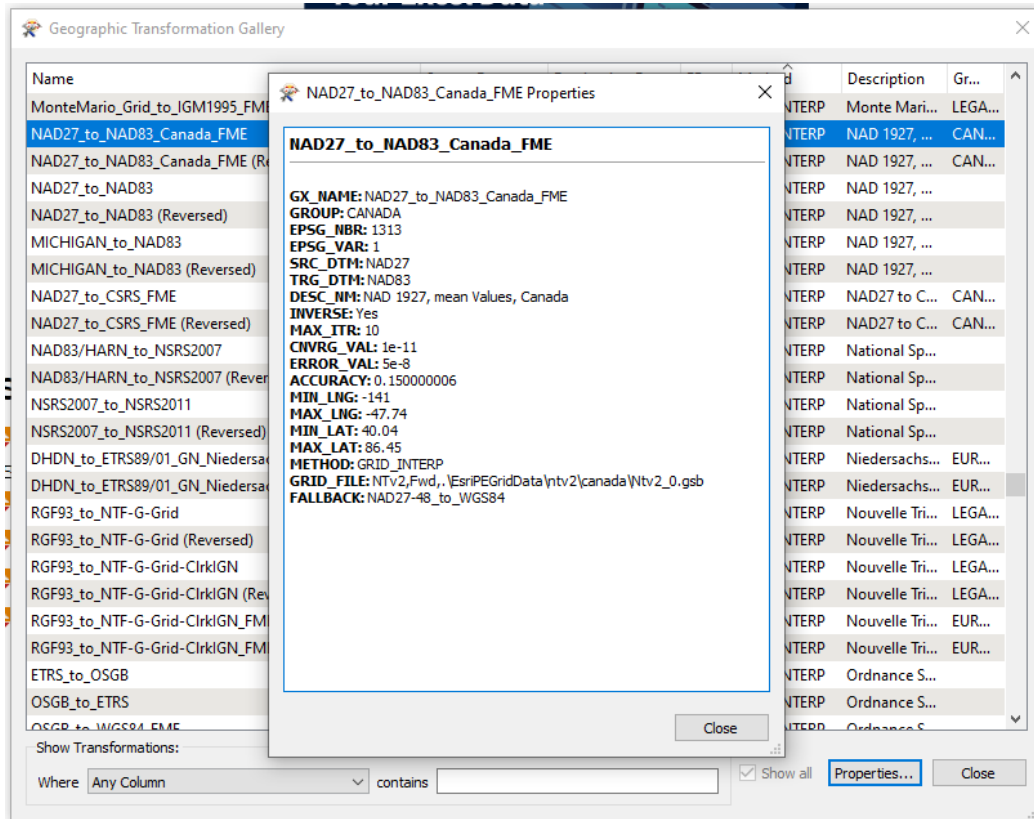


Ilustración 26. Definición de la transformación NAD27 a NAD83 a través del método de la rejilla para Canadá. Notemos el valor de GRID_FILE que apunta a un archivo con datos de puntos regulares de control en ambos marcos de referencia geográficos. Notemos el error es del orden de 5×10^{-8} y la exactitud es de 0.150000006 FME Workbench 2019.2.

Ejemplos de DATUM: NAD27, NAD83, WGS84 (no el elipsoide sino el DATUM), SIRGAS2000, entre otros.

Existen DATUM verticales, estos permiten mejorar la certeza de las transformaciones de los valores de h . Estos pueden ser definidos a partir del elipsoide o a partir de un modelo gravimétrico tendiendo hacia un modelo ortométrico. Algunos de estos son: NGVD1929, NAVD1988, EGM1996, entre otros. Usualmente los GIS no emplean DATUM verticales específicos a menos que se indique que la data cuenta con valores z o h .

Importante:

Las transformaciones de marcos de referencia son procesos que suelen introducir errores en los valores de las coordenadas, por ello es importante considerar el procedimiento que se emplea (algoritmo). Existen métodos (algoritmos) que minimizan los errores y otros que pueden introducir incertidumbres de considerables en la posición.

Procesos ETL geográficos, las mejores prácticas

Debemos considerar que ya en 1992 C. Franklin planteó que más del 80% de los datos disponibles (en ese momento) contaban con algún componente espacial, ya sea porque en estos existía alguna referencia relativa a una ubicación o porque ya contaba con datos espaciales explícitos en forma de una localización o un rasgo geográfico (Franklin, 1992). Si consideramos la enorme cantidad de datos posicionales (principalmente por medio de GPS baratos y poco precisos) podemos decir que puede haber rebasado este criterio hace ya algún tiempo. Como mencionamos en La calidad de los datos espaciales esto ha contribuido al deterioro de la calidad de un volumen importante de estos. Sin embargo, debemos considerar que tienen una utilidad, pero con las reservas que debe tenerseles.

Hasta ahora hemos presentado los criterios de calidad de los datos, exponiendo los aspectos más importantes a considerar en la evaluación y documentación del linaje de los datos espaciales. Posteriormente algunos elementos básicos para comprender la importancia y cuidado que debe tenerse al aplicar procesos de cambios de proyección y marco de referencia geográfico por el impacto que tienen en el deterioro de la calidad posicional de los datos espaciales, sin importar cuál método y con cuánto cuidado se realicen.

Ahora veremos lo que denominamos ETL geográfico o espacial. ETL: extracción, transformación y carga (*Extraction Transformation and Load, inglés*). Los procesos ETL, aun los que son procesos delicados y deben definirse con mucho cuidado porque la transformación de los datos puede ser tal que la hace inservible para los propósitos deseados.

Los procesos ETL geográficos se definen en dos sentidos, uno para transformar la parte alfanumérica de los datos y la otra la espacial. No siempre habrá atributos alfanuméricos, pero si se trata de datos espaciales sí habrá información de ese tipo. El caso de los datos ráster, no suele haber datos alfanuméricos o atributos asociados, a excepción de los metadatos. De lo contrario, en el caso de los datos de naturaleza vectorial es común que existan atributos alfanuméricos o incluso multimedia, que permite una mejor caracterización de los rasgos¹¹ de una clase de rasgos (clase) determinada.

Definición del proceso ETL

Cualquier proceso ETL debe definirse en función de dos principios básicos: (i) las condiciones en las que se encuentran los datos origen o fuente (vea La calidad de los datos espaciales) y (ii) el uso que tendrán estos.

Las condiciones iniciales de los datos fuente deben evaluarse cuidadosamente. Entender qué son, cómo están, cuáles procesos han sufrido, en qué formato o formatos han estado almacenados o gestionados, su

¹¹ Emplearemos el término *clase de rasgo* y *rasgo* en lugar de *capa* y *objeto*. Esto por concordancia con los términos empleados en la documentación de la OGC.

estructura, es decir debemos conocer el linaje detallado de estos. Un buen proceso ETL debe considerar estos factores porque existen posibles casos de representaciones que ya no se emplean por sus limitaciones, su antigüedad o porque no son una buena práctica el hacerlo.

El destino o uso planeado de los datos es también relevante porque definirá técnicamente algunos aspectos del tratamiento (transformación e higienización) de estos, su formato destino, nivel de normalización necesarios, etc.

Los requisitos

Los requisitos son las especificaciones del usuario (o usuarios), que define las características (en nuestro caso) de los datos (incluyendo los espaciales) o del negocio (Malinowski & Zimnyi, 2008). Si son parte de un proceso de análisis para la elaboración de un sistema, entonces se obtienen no sólo a partir de los deseos del usuario sino también a partir de las restricciones impuestas por las características funcionales y tecnológicas del sistema.

Ahora bien, debemos incluir en este proceso el de obtener las características de los datos originarios, si es que ya existen y se encuentran disponibles, sea de forma directa o por medio de la información de metadatos.

Si hay acceso a los datos un proceso de exploración es muy conveniente. Con herramientas de software GIS se puede tener una idea clara de los datos y apreciar las características que quizás, aún con metadatos disponibles, no se pudo apreciar.

Los siguientes aspectos son necesarios de verificar.

- a. Verificar en qué proyección y marcos de referencia geográfico.
- b. Verificar el tipo de geometría, si es vectorial, si es homogénea o no en cuanto al tipo de geometría (Ilustración 2. Modelo de objetos geométricos de las especificaciones “Simple Features”. Fuente: (OGC, 2010). (OGC, 2010).

Es conveniente verificar, además, la calidad de la geometría, es decir, si existen, en una simple investigación exploratoria anomalías o inconsistencias en cuanto a la configuración geométrica y de contar con elementos que lo permitan, la consistencia en cuanto a las reglas topológicas de los elementos.

- c. Si es ráster verificar qué características en cuanto a si representa una imagen, un modelo digital de elevación o superficie, un mapa reticular.
 - i. Para las imágenes debe considerarse el tamaño o cubrimiento, el tamaño del píxel (en referencia a la Tierra), las bandas espectrales (sensor) y formato;

- ii. Para los modelos digitales, sean de terreno o superficie, es importante conocer su cubrimiento y el tamaño del píxel;
 - iii. Para los mapas reticulares (*grid maps*)¹², el tamaño de la celda (en unidades terrestres), su cubrimiento y la forma en que están codificados los valores cualitativos o cuantitativos de estas.
- d. Si se trata de nubes de puntos¹³, conocer sus características en cuanto a su cubrimiento, densidad de puntos, tipo de adquisición (aerotransportado, terrestre o móvil), formato y tipo de sensor empleado.
- e. Los atributos asociados. Si existe un diccionario de datos, entonces verificar que corresponde al conjunto de datos a los que se le está haciendo la exploración. Es conveniente en este sentido verificar:
- i. La nomenclatura de los nombres de los campos. Verificar si poseen caracteres que no deben transferirse al nuevo modelo, i.e. acentos, eñes, caracteres especiales, etc.
 - ii. La longitud de los datos. Es común emplear campos de mayor capacidad, con un margen excesivo de seguridad, para garantizar que nunca se produzcan pérdidas por falta de este recurso en el almacenamiento.
 - iii. La consistencia lógica entre el tipo de dato y lo que representa.

Problemas más comunes con los datos espaciales

Valores de las coordenadas fuera de rango

Cualquiera que sea el formato de almacenamiento de las coordenadas estos tienen un dominio de valores válidos. Las coordenadas geográficas de longitud y latitud tienen dominios específicos definidos, -180° a 180° para la primera y -90° a 90° .

Para coordenadas proyectadas, el dominio de los componentes X (Este) e Y (Norte) dependen de la proyección. A continuación, mostramos algunos:

- a. **UTM:** Para el hemisferio norte hasta 9,300,000 m (84°), para el sur, en el ecuador el valor es 10,000,000 m decreciendo hasta 1,100,000 m (-80°). Las franjas en el ecuador son de 6° , con 3° de cada lado, es decir con las coordenadas de 167,000 m hasta 833,000 m.
 $167,000\text{ m} \leq x \leq 833,000\text{ m}$ y $0 \leq y \leq 9,300,000\text{ m}$, para el hemisferio norte o
 $10,000,000\text{ m} \geq y \geq 1,100,000\text{ m}$, para el hemisferio sur.

¹² Aunque es poco frecuente el empleo de mapas reticulares deben considerarse estos. Son un tipo de dato ráster.

¹³ Tipo de dato obtenido por medio de sensor laser (LiDAR).

- b. **Mercator:** Tiene la misma restricción para la latitud, es decir su dominio es de -80° a 84° y -180° a 180° para longitud con el dominio de x e y : $-20,037,508.3428 \text{ m} \leq x \leq 20,037,508.3428 \text{ m}$ y $-15,496,570.7397 \text{ m} \leq y \leq 18,764,656.2314 \text{ m}$.

Unidades de almacenamiento no convenientes

Este es un problema común por la falta de entendimiento sobre los procesos de producción cartográfica. A continuación, mostramos en la Ilustración 27 un caso en el que se entrega una base planimétrica en formato SHP del catastro. Esta base planimétrica posee la siguiente definición en su archivo *PRJ*¹⁴:

```
GEOGCS["GCS_WGS_1984",DATUM["D_WGS_1984",SPHEROID["WGS_1984",6378137,298.257223563]],PRIMEM["Greenwich",0],UNIT["Degree",0.017453292519943295]]
```

Observemos que las coordenadas se encuentran almacenadas en unidades de grados (*sección UNIT*). Esto significa que la longitud de un lado de cualquiera de estos polígonos depende en su proceso de determinación de la latitud. El arco de un 1 segundo en su proyección hacia un paralelo será diferente en función de la latitud, en el Ecuador su valor es de alrededor de 30 m, pero a los 19 grados Norte es menor alrededor de 28 m.

¿Es menos preciso almacenar en unidades geográficas que en metros? No, no se trata de eso. Lo que sucede es que en cada ocasión para visualizar y medir se debe transformar hacia una proyección plana. Usualmente en las aplicaciones Web se emplea Web Mercator para mostrar los datos en *EPSG 4326*, cuya definición es exactamente el *PRJ* anterior. Entonces lo que sucede es que se realiza un proceso de proyección y en algunos casos de transformación del marco de referencia geográfico para ajustarse a uno que permita su conveniente visualización.

Si aplicamos las ecuaciones (*xxv*) y (*xxviii*) para calcular las coordenadas Este y Norte (x,y) en *Mercator*, podemos observar que se introducirá un error en la exactitud de la posición. Si fuésemos a editarlo (en el plano *Mercator*), entonces el software tendría que aplicar las ecuaciones (o equivalentes) (*li*) y (*lii*) con un proceso recursivo en la segunda, que también introducirá otro error en la exactitud de las posiciones.

Si la data no se editará, entonces las coordenadas geográficas no son un problema mayor, a menos que empleen los rasgos como “anclas” para la definición de otros rasgos en un espacio proyectado.

¹⁴ Los archivos *PRJ* poseen la definición del sistema de referencia en un convenio *WKT-ESRI*, en lugar de *WKT-OGC*.

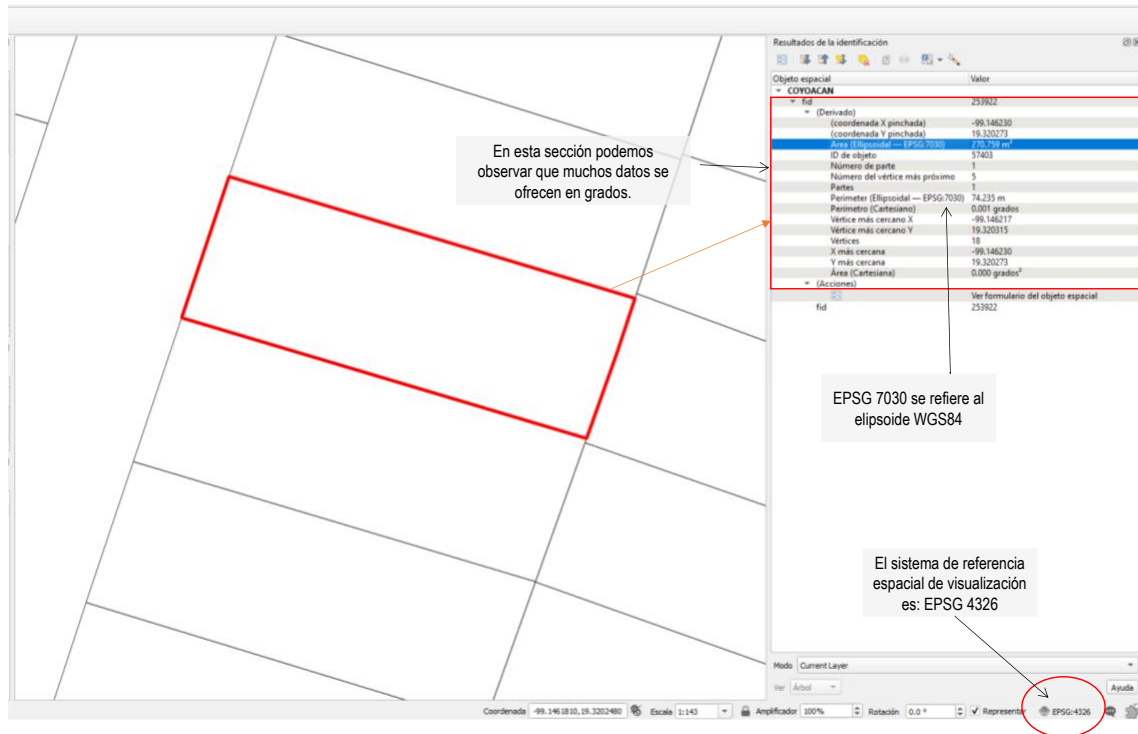


Ilustración 27. Este es un caso en el que podemos observar predios provenientes de una fuente (catastral) en la que los datos se encuentran almacenados en coordenadas geográficas. Es ejemplo se realizó con QGIS. <https://qgis.org/es/site/>

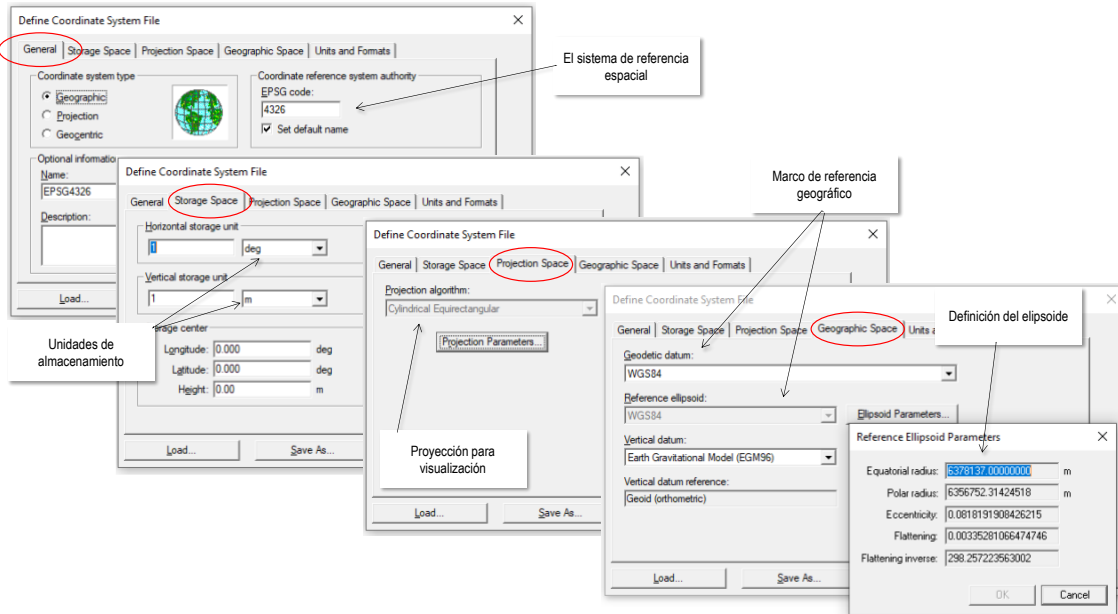


Ilustración 28. Geomedia Viewer (gratuito) posee una aplicación denominada "Define Coordinate System File", que además de mostrar las características de las proyecciones y marcos de referencia, permite definirlos. En la ilustración observamos la definición de EPSG 4326, y podemos ver que la tercera pestaña ("Projection Space") tiene un campo denominado "Projection Algorithm" (algoritmo de proyección) con el valor "Cilíndrico Equirectangular". Ejemplo con Geomedia Viewer 2020. <https://www.hexagongeoespacial.com/products/power-portfolio/geomedia-add-ons/geomedia-viewer/>

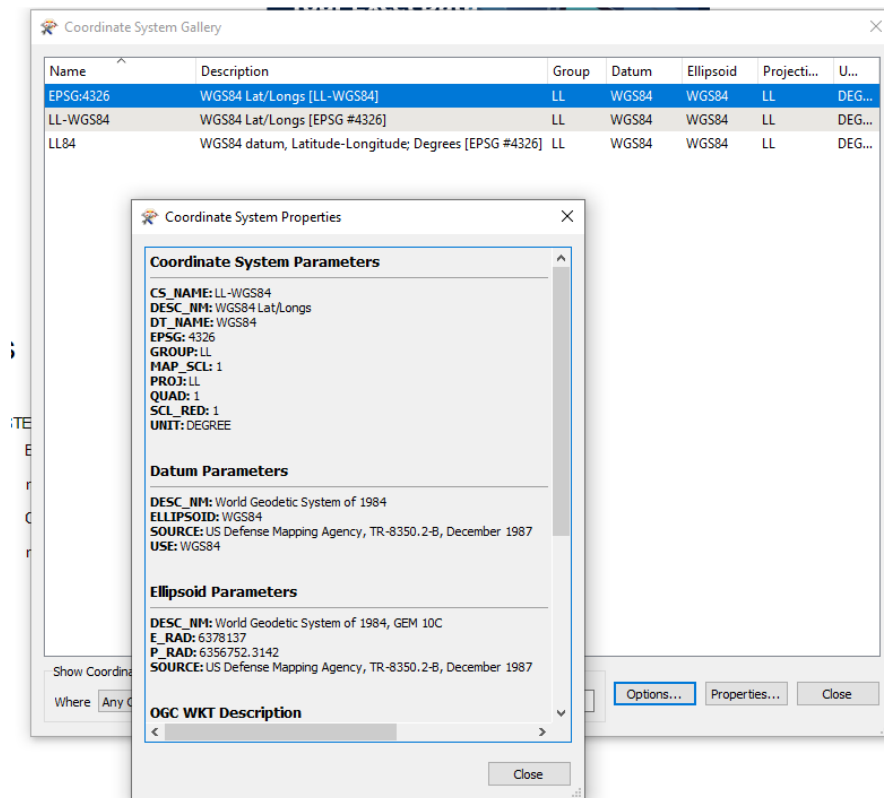


Ilustración 29. EPSG 4326, su definición en FME Workbench 2019.2.

Importante:

El almacenamiento de las coordenadas en unidades geográficas no es recomendable para rasgos que deben representar entidades geométricas con una alta exactitud posicional y modificarse (editarse) por los procesos de transformación hacia espacios cartesianos, ni deben emplearse con rasgos de referencia para otros rasgos que requieran un error posicional controlado.

Características del componente espacial de los datos

La conformación geométrica de los rasgos es un aspecto que usualmente no se contempla últimamente porque los GIS han procurado integrar procesos para compensar las configuraciones erróneas. Sin embargo, es importante considerar que geometrías bien configuradas permiten aligerar las labores de “validaciones al vuelo” y evitan errores en los procesos analíticos (espaciales).

Las configuraciones erróneas o no válidas fueron más comunes en los inicios de la cartografía automatizada porque la tecnología no tenía la madurez actual y porque durante el proceso de conversión de los medios tradicionales en soporte físico (papel principalmente) se empleaban medios de digitalización no siempre con el nivel profesional suficiente o bien porque los procesos de restitución fotogramétrica híbrida (equipos analíticos con codificadores digitales) empleando programas CAD no contaban con funciones que previnieran algunos de los errores más comunes de aquellos tiempos.

Veamos sin embargo los principales problemas de la configuración geométrica:

Nodos muy cercanos en una polilínea o polígono

Los nodos o puntos que definen una polilínea o polígono pueden encontrarse a distancias por debajo de la exactitud de la cartografía. Este problema puede llegar al extremo de que en un nodo existan varios puntos (nodos redundantes), que son innecesarios y que por definición crean otro tipo de error que veremos más adelante.

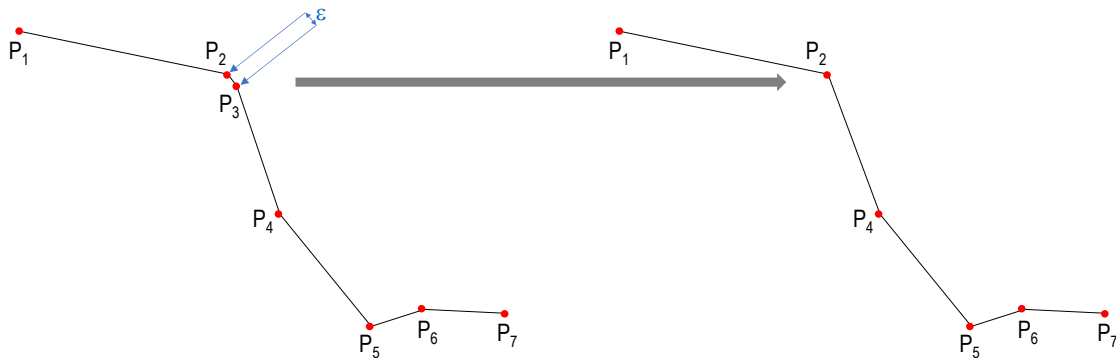


Ilustración 30. Si la exactitud fuese mayor que el valor de ε entonces estaremos en la presencia del caso de que P_2 y P_3 son redundantes (izquierda). En la parte derecha observamos el mismo elemento "corregido", y podemos apreciar que P_3 ya no forma parte de la definición de la polilínea.

Es importante estar consciente de la exactitud posicional de la fuente de datos. Si esta es de 10 cm, entonces dos nodos a menos de esa distancia se pueden considerar como nodos redundantes y es recomendable durante el proceso **ETL** eliminar aquellos que no son necesarios y que no afectarán a la calidad de los datos.

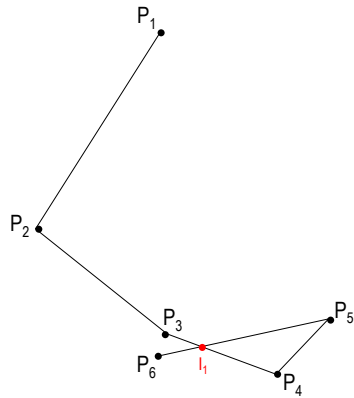
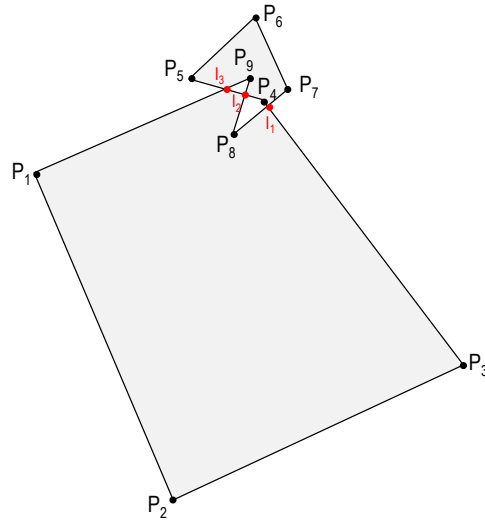
Elementos minúsculos

Este es un error que se produce algunas veces por varias razones, algunas de estas pueden ser:

- El técnico fotogrametrista hizo un trazo accidental;
- El técnico marca un rasgo puntual, pero hubo un error en la selección del tipo de geometría o
- La cartografía sufrió un proceso que asumió que dos puntos cercanos definen un segmento.

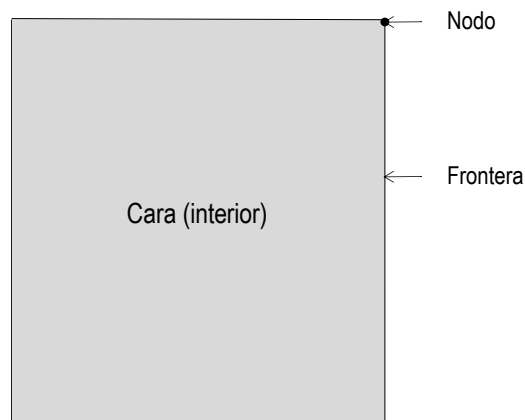
Las fuentes provenientes de archivos (formatos) **CAD** son las más propensas a contar con este tipo de problemas. Los formatos (monotipo) como **SHP** no se exentan de estos problemas, pero se deben más problemas de tratamiento en algún producto **GIS**.

Es un error que también ocurre en caso de fuentes con clases de rasgos lineales o superficiales que se producen por errores de procesamiento. Antes solía referirse a ellos como "*basuritas*" o en el caso lineal de "*micro-pelos*".

Auto interseccionesPolilínea con auto intersección en el punto I_1 Polígono con auto intersección en los puntos I_1, I_2 y I_3 *Ilustración 31. Dos ejemplos, uno de polilínea y otro de polígono que se auto intersecan.*

Es un error que ocurre cuando un elemento lineal o superficial de auto interseca. No siempre es se puede considerar como error excepto para los elementos superficiales. Los elementos lineales pueden intersecarse a sí mismo si representan un rasgo que así es en la espacio real u objetivo.

Para los elementos superficiales este problema se constituye en un error en su representación topológica porque un nodo puede formar parte del interior de la superficie, además de que alguna parte o toda una frontera puede intersecarse o encontrarse en el interior (cara).

*Ilustración 32. Representación topológica de un polígono. La cara es el interior, la frontera es la "orilla" y el nodo es el punto inicial que define al elemento geométrico.***Huecos y traslapes**

Los huecos y traslapes son productos, principalmente, de errores en los procesos de digitalización. Los traslapes son la superposición de dos áreas de la misma clase de rasgo que por su regla de conformación

geométrica no deben hacerlo. Por otra parte, los huecos, son los espacios que existen entre rasgos superficiales (que representan áreas) que por su regla de conformación geométrica no debería. Un caso puede ser el de predios contiguos que tienen pequeñas áreas (huecos) entre ellos, cuando por definición no pueden existir.

Polígonos abiertos

Antes de la adopción del modelo de polígonos para representar las superficies (áreas) se empleaba una representación denominada área-centroide. Esta era una representación donde un área se definía a partir de polilíneas, representando la frontera, y un centroide, un punto (o etiqueta gráfica). Los **GIS**, al necesitar realizar una operación espacial que requería la representación de este como áreas, convertía, a veces en disco (un archivo) o en memoria una representación topológica.

La razón por la que ya no se emplea esa representación, a pesar de algunas ventajas que tenía, radicaba en la necesidad de realizar operaciones de cómputo intensivo frecuente para prácticamente cualquier consulta o análisis. Otra razón, quizás la de mayor peso, era la dificultad de mantener los datos en buenas condiciones, procurando que las polilíneas siempre definiesen áreas cerradas y que no hubiese dos (repetidos) definiendo una frontera común.

Sin embargo, pueden encontrarse con fuentes que definen áreas de esta forma, en ese caso, deberá procurarse que no existan áreas abiertas. Usualmente existe una tolerancia para indicar a partir de cuándo dos nodos se consideran un punto común. En el proceso **ETL** se debe considerar convertir esta representación hacia el modelo que se emplea usualmente, es decir realizar un proceso de conversión a polígonos (*poligonización*).

Orientación de los polígonos

Aunque hoy en día, la identificación de un área se hace a partir de la identificación de la entidad en el formato fuente, existen algunas soluciones **GIS** que emplean el criterio **OGC** (OGC, 2010) que es el siguiente:

- a. Un área (superficie o polígono) se define a partir de sus nodos (puntos) en sentido contrario a los sentidos a las manecillas del reloj (derecha a izquierda). Así un anillo cerrado (ver Ilustración 33) definido de esta forma se considera un área cerrada, aunque no necesariamente un polígono. Si se clasifica como tal, entonces se considera que es un polígono bien conformado o definido.
- b. Los huecos, se definen en sentido contrario, es decir los nodos (puntos) deben estar en sentido de las manecillas del reloj (de izquierda a la derecha).

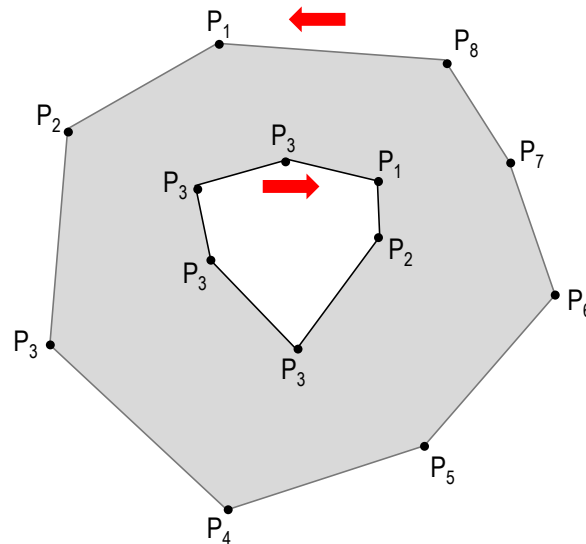


Ilustración 33. Podemos apreciar que la parte “sólida” se define por los puntos en el sentido contrario a las manecillas del reloj y el hueco en el sentido contrario.

Un ejemplo de un almacén o fuente de datos no estricto en este sentido es Oracle. Cuando se define a *SDO_GEOMETRY*¹⁵, simplemente emplea identificadores para indicar el “anillo exterior” (*Type=1003*) y otro el “interior” (*Type=2003*). (Kothuri, Godfrind, & Beinart, 2007).

Los huecos sólo pueden definirse como multi-superficies (multi-polígonos), lo que hace que sean entidades definidas como colecciones homogéneas, es decir de un mismo tipo de geometría.

Importante:

Consideren siempre en emplear, en la medida de lo posible, la definición OGC. Esto garantiza que cualquier operación espacial siempre produzca los resultados deseados.

Islas

Se definen a las islas como a objetos que representan áreas pero que se encuentran desconectados físicamente de una superficie raíz, principal, “padre” o “madre”. Usualmente los rasgos que representan o caracterizan a la naturaleza no emplean esta representación, es mucho más común en el caso de rasgos que son productos de la actividad humana o de su conceptualización.

Las entidades que se definen como un conjunto de polígonos disconexos, al igual que las entidades que contienen huecos, sólo pueden definirse como colecciones homogéneas.

No siempre es conveniente conservar esta representación, de no serlo entonces debe separarse en el proceso **ETL** para que cada uno se convierta en un objeto geométrico independiente.

¹⁵ Oracle emplea un modelo mixto objeto-relacional, donde *SDO_GEOMETRY* define como un arreglo multidimensional (objeto), y a su vez este es una columna de una tabla relacional. En las primeras implementaciones (versiones 7 y 8) empleaba un modelo relacional puro.

Como curiosidad, en la información referente a municipios (de México) podemos observar que existen varios casos de municipios con partes de su territorio sin continuidad con respecto a su parte mayor (i.e. Tlalnepantla, en el Estado de México, con la “Isla de Tlalne” es un buen ejemplo).

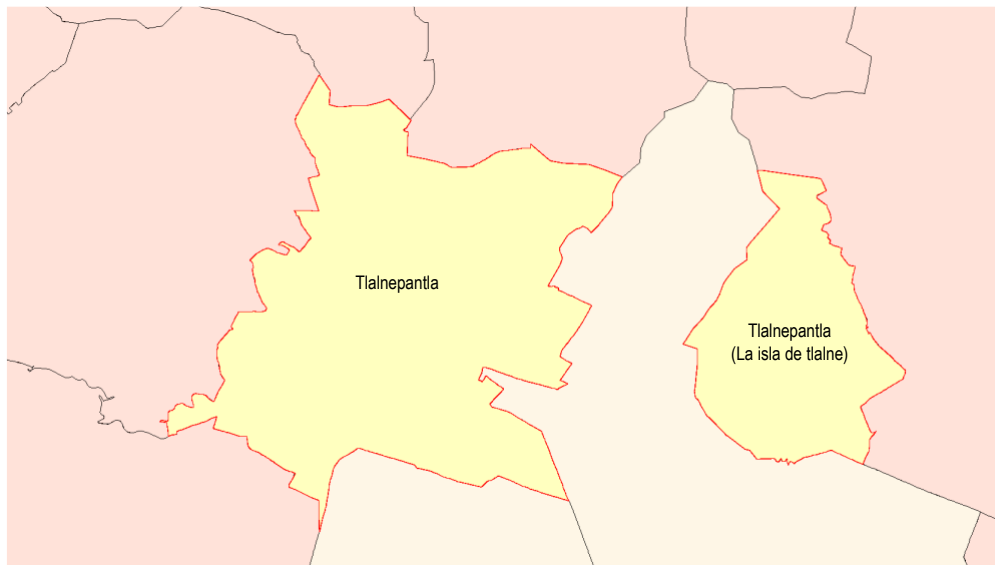


Ilustración 34. Ejemplo de un municipio con su “isla”.

Falsas intersecciones

Las falsas intersecciones son intersecciones en los objetos lineales que realmente no existen. Para un GIS y en especial para la representación de redes las intersecciones tienen que ser intersecciones geométricas.

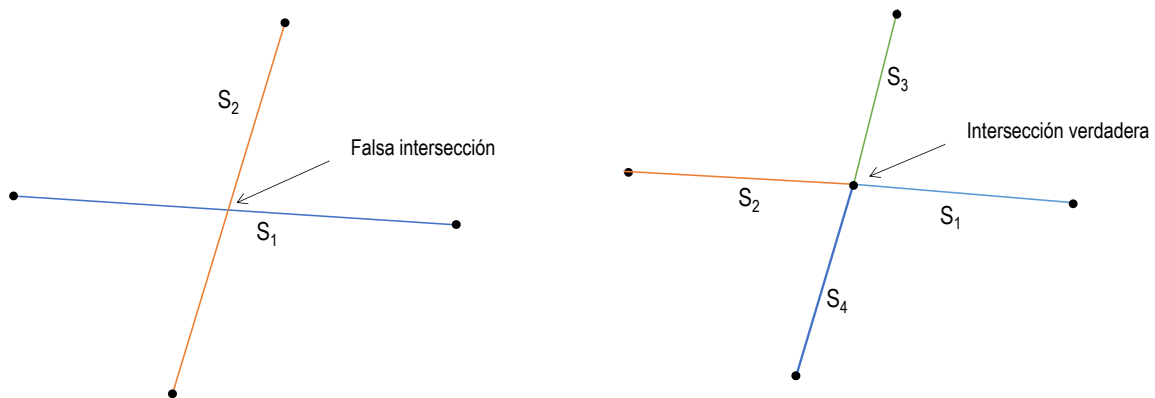


Ilustración 35. El caso de la izquierda con una falsa intersección, el de la derecha con una intersección verdadera. Notemos que en la izquierda son dos segmentos, el de la derecha son cuatro.

Los procesos de análisis de redes necesitan o al menos es conveniente que cuenten con una estructura del siguiente tipo:

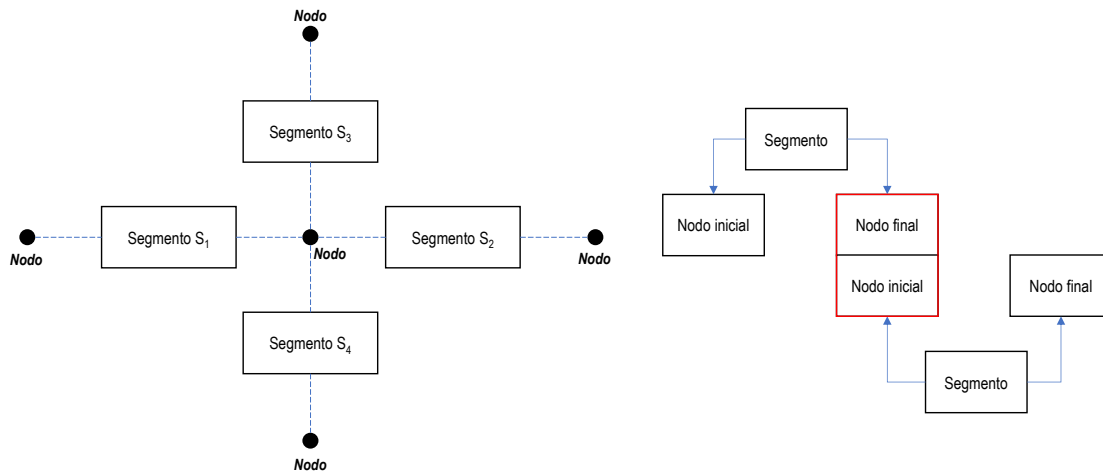


Ilustración 36. Modelo tipo de una red.

Características del componente alfanumérico de los datos

Nombres de los campos

Muchos formatos y gestores de datos han flexibilizado sus reglas para nombrar campos. Aun así, es importante seguir una serie de reglas de buenas prácticas:

- No emplear signos como: *, /, \, #, \$, %, &, - o +.
- No emplear acentos ni otros signos ortográficos o ñes.
- Procurar no dejar espacios.
- Preferiblemente emplear mayúsculas.
- No exceder de 32 caracteres o lo que el formato destino permita (hay algunos que sólo permiten 8 caracteres).

Número de campos

Aunque es inusual existen ocasiones en los que podrán encontrarse con un número grande campos, digamos más de 100 (es sólo ilustrativo). Por lo general estos conjuntos de datos excesivamente grandes en el número de campos suele clasificarse como datos extremadamente “planos”.

No es que los gestores de datos, formatos y programas **GIS** no puedan manejar un número grande de columnas o campos, sino simplemente deja de ser práctico emplearse y sobre mantenerse. Debe considerarse quizás un proceso de normalización.

Campos numéricos

Los campos numéricos, sean enteros, enteros largos, decimales o reales de simple o doble precisión son algunos de los casos que encontramos en el proceso de análisis de las fuentes de datos en su componente alfanumérico.

En función de los formatos de destino, digamos en un gestor de datos, los **GIS** y **ETL** espaciales, suelen corresponder correctamente el tipo de dato origen con uno de destino en el repositorio final. Sin embargo, podrán encontrarse casos en los que por un error en el procesamiento anterior valores que se esperan que sean numéricos se encuentran definidos como campos de texto. En esos casos debe evaluarse el uso al que se le dará al contenido y definir una conversión conveniente hacia uno numérico, verificando que puede convertirse y si hay valores nulos, estos se mantengan como tal.

Campos de texto

Los campos texto son aquellos que permiten almacenar en ellos palabras y números básicamente. Debe observarse con cuidado que los campos no se encuentren definidos en su longitud correctamente en correspondencia con el tamaño (número de caracteres) del conjunto de datos.

Es usual que los campos se encuentren “sobre dimensionados” es decir que la definición de su longitud es excesiva. Cuando esto ocurre es conveniente, de no contar con claridad, emplear en gestores de datos que lo soporten, datos longitud variable. De lo contrario debe investigarse el contenido de mayor longitud almacenado y definir en el destino este valor con quizás una tolerancia.

Igualmente, si se prevé que un campo, aunque de longitud reducida podrá contener un dato de mayor tamaño, entonces es conveniente considerar redefinir la longitud de este.

Importante:

No empleen campos, por ejemplo, de texto de 256 caracteres para almacenar contenido que no excederá nunca, digamos, 128 caracteres. Los excedentes 128 caracteres son reservados, pero jamás usados, produciendo un problema en la gestión del espacio de almacenamiento.

Campos de fecha y tiempo

Las fecha y tiempo, o incluso lo que llaman “*timestamp*” son tipos de datos que almacenan fechas y horas. Son tipos específicos de datos que deben ser considerados con cuidado en el repositorio de destino porque diferentes formatos y gestores de datos dan tratamientos diferentes (no necesariamente radicalmente diferente) a estos tipos de datos.

Evaluar su destino o uso intencionado es importante para considerar o no el uso de una variante específica. Sin embargo, los **ETL** espaciales suelen realizar correctamente esta correspondencia.

Hiperligas

Las hiperligas no son esencialmente un tipo diferente de dato o campo de diferente tipo que los de texto. La diferencia usualmente se hace para que programas hagan un uso diferente del contenido.

Precisamente su contenido puede contener caracteres especiales o referencia a *URL* que pueden, de no considerarse, constituir en un riesgo de seguridad.

Identificadores únicos

Los identificadores únicos son por lo general campos enteros (largos) autogenerados o que se definen como llave primaria de un conjunto de datos. Es importante considerar que puede o no conservarse este como campo llave o crear en el proceso **ETL** uno nuevo. Otro aspecto importante es que existen nombres convencionales de campos llaves que pueden tener connotación diferente en diferentes formatos y gestores de datos.

Recomendación:

Empleen las mejores prácticas en el diseño de sus repositorios de destino. Un buen texto de referencia es “Advanced Data Warehouse Design: From Conventional to Spatial and Temporal Applications” (Malinowski & Zimnyi, 2008).

Lectores y escritores

En los procesos ETL es importante considerar los formatos en los que se encuentran los datos para seleccionar el procedimiento de lectura adecuado. Para el caso de los **ETL** espaciales, estos soportan datos no tradicionales de carácter espacial, sean ráster o vectorial.

Si se emplea un **GIS** tradicional, este paso consisten en abrir la fuente de datos con la funcionalidad correcta y en su caso realizar los ajustes necesarios. Nos concentraremos en los **ETL** espaciales, porque ilustran de forma explícita el proceso de lectura, transformación y escritura, pero los **GIS** son instrumentos igualmente convenientes para conjuntos no muy grandes. En lo sucesivo ilustraremos los casos a partir de ejemplos en *FME*¹⁶.

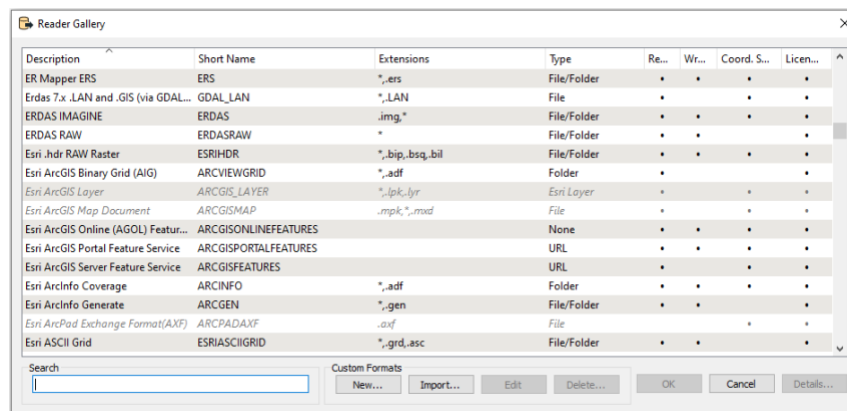


Ilustración 37. Lista (vista parcial) de los formatos de datos soportados para la lectura en FME.

Los lectores de datos (“Data readers”) son los componentes encargados de leer los datos y cargarlos. Usualmente no realizan ninguna transformación, sino que sólo la cargan a una representación interna del ETL para efectos de poder gestionar los procesos de forma más eficiente.

¹⁶ FME 2019.2 es un ETL espacial de Safe Software. <https://www.safe.com/>

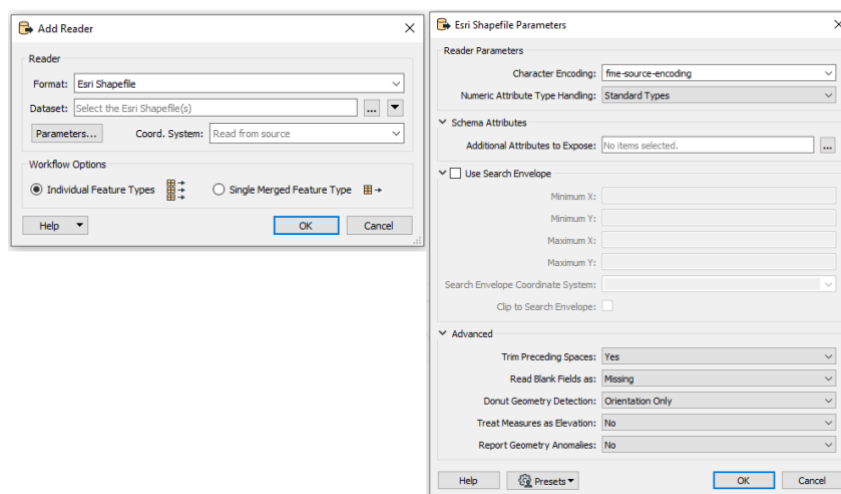


Ilustración 38. Opciones del lector de datos para la lectura de datos en formato SHP en FME.

Transformaciones

Es importante definir las transformaciones necesarias, pero para ello debe comprenderse que existen en el mundo de los ETL espaciales grupos de transformaciones:

1. Transformaciones de datos alfanuméricos:
 - a. Operaciones para validar el tipo de dato.
 - b. Operaciones para tratar las cadenas: sustitución de caracteres, cambiar a minúsculas o mayúsculas, recortar, sustituir palabras, etc.
 - c. Operaciones de conversión de tipo de datos, numéricos a alfanuméricos y viceversa.
2. Operaciones de clasificación de entidades espaciales:
 - a. Vectoriales: puntos, líneas, áreas, superficies (3D), geometrías simples, geometrías complejas,
 - b. Nubes de puntos.
 - c. Ráster.
3. Transformaciones de sistemas de referencia espacial

Son aquellas que están relacionadas con los sistemas de referencia espaciales.

 - a. Operaciones de cambios de proyección.
 - b. Operaciones de cambio de marcos de referencia geográfica.
 - c. Validación de los sistemas de referencias espaciales.

4. Operaciones vectoriales:

Son aquellas operaciones que afectan a la geometría vectorial:

- a. Validación del cumplimiento de las especificaciones OGC para tipos de geometrías.
- b. Validación de las reglas de configuración geométrica de los objetos.
- c. Corrección de errores en la configuración geométrica de los objetos.
- d. Eliminación de puntos redundantes, elementos pequeños, áreas entre polígonos contiguos (huecos), traslapes, etc.
- e. Creación de intersecciones verdaderas.
- f. Validación de la topología.
- g. Creación de vectores a partir de elementos ráster.
- h. Rasterización de objetos vectoriales.
- i. Creación de modelos GRID para álgebra de mapas a partir de áreas vectoriales.
- j. Creación de teselas vectoriales.
- k. Extrusión 3D, creación de elementos tridimensionales a partir de objetos de dos dimensiones.
- l. Simplificación, eliminación de puntos intermedios.
- m. Generalización cartográfica.

5. Análisis espacial:

Las operaciones de análisis espacial son aquellas que se realizan aplicando operadores espaciales para generar nuevas entidades, sean ráster o vectores.

- a. Operaciones espaciales vectoriales.
 - i. A una distancia de... y su negación. (Se encuentra a una distancia ***d***).
 - ii. Hasta una distancia de... y su negación (Se encuentra a una distancias igual o menor a ***d***)
 - iii. En contacto con... o toca a... y su negación. (***A*** toca a...).
 - iv. Lo que está en contacto con... y su negación. (Lo que está en contacto con ***A***)
 - v. Cubre a... y su negación. (***A*** cubre a ***B***... o Lo que cubre a ***C***...)
 - vi. A través de... y su negación.

- vii. Se sobrepone a... y su negación.
 - viii. Se encuentra dentro de... y su negación.
 - ix. Es igual a... y su negación.
 - b. Operaciones espaciales reticulares (álgebra de mapas).
 - c. Operaciones de clasificación y análisis de imágenes.
 - d. Operaciones con redes y segmentación dinámica.
 - e. Operaciones de análisis tempo-espacial.
6. Estadística y Matemáticas:
Operaciones matemáticas y estadísticas para efectuar cálculos.
- a. Operaciones matemáticas.
 - b. Estadística.
 - c. Conversión entre tipos de datos numéricos.
 - d. Geometría.
7. Operaciones ráster:
Operaciones que afectan a formatos ráster.
- a. Extracción de histogramas.
 - b. Extracción de bandas.
 - c. Operaciones píxel a píxel.
 - d. Generación de curvas de nivel a partir de MDE.
 - e. Generación de modelos triangulares a partir de MDE.
 - f. Extracción de sub-escenas.
 - g. Orto-rectificación.
 - h. Creación de mosaicos.
 - i. Creación de teselas ráster.
8. Operaciones de base de datos:
- a. Consultas a repositorios estructurados y no estructurados.
 - b. Creación de tablas, vistas, etc.

- c. Vinculación entre entidades (*join*).
 - d. Etc.
9. Nubes de puntos.
10. Modelos o maquetas 3D.

Existen otros tipos de transformaciones, pero para mantener la simplicidad sólo enunciamos los anteriores.

Una transformación T cualquiera, esta tendrá una o varias entradas de flujos de datos y una o varias salidas que pueden ser tanto datos transformados, valores calculados o reporte de errores en tiempo de ejecución de la transformación.

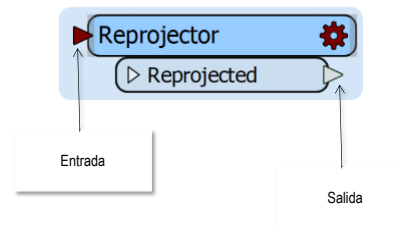


Ilustración 39. Transformación de proyección (cambio) en FME.

En la ilustración anterior podemos ver un “transformador” simple, de reproyección, es decir modifica la proyección de los datos de entrada y en la salida ya se encontrarán los objetos en la nueva proyección.

En la siguiente ilustración se puede observar un “transformador” para la geometría vectorial. Podemos observar que tiene una entrada y varias salidas.

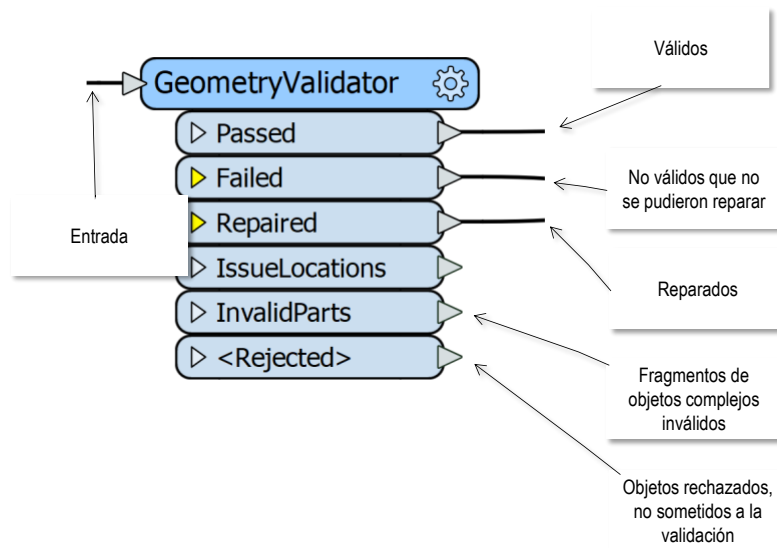


Ilustración 40. Validación de la geometría (vectorial) en FME.

Un “transformador” puede en muchos casos poseer más de una entrada. En el caso de *FME* no se aprecia una entrada adicional, siempre y cuando es un flujo “equivalente de datos” es decir que su estructura es equivalente. Sin embargo, si un “transformador” emplea dos fuentes (entradas) es usualmente porque una es para un tipo de flujo de datos diferente al otro, y este realiza algún proceso uno respecto al otro. La siguiente ilustración muestra un ejemplo que forma parte de un proceso en el que el “transformador” es un filtro espacial que garantiza que los datos que cumplan la condición de encontrarse en un área determinada sean admitidos al siguiente paso del proceso o de lo contrario son considerados con “no aptos” por no cumplir la condición.

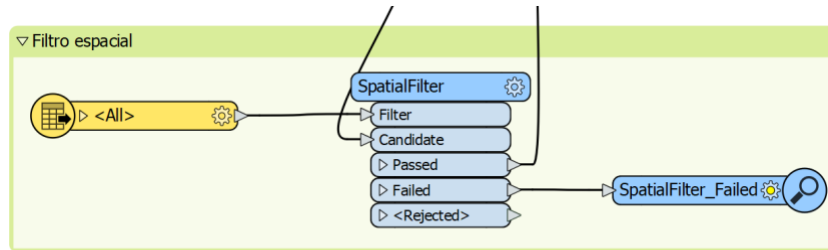


Ilustración 41. Filtrado espacial de un flujo de datos en FME.

Aunque hemos presentado algunos ejemplos en *FME* debemos considerar que productos como *ArcGIS desktop*, *Geomedia desktop*, *ERDAS Imagine* y otros, en función de sus versiones pueden ejecutarse procesos similares e incluso definir algunos de este tipo.

Diseño de procesos ETL

Por lo general una herramienta de **ETL** espacial o un **GIS** con funcionalidades equivalentes posee algunas características comunes, posee lectores en varios formatos, opciones de escritura, también en varios formatos y una galería de transformaciones disponibles. Algunos tendrán un mayor número que otros de opciones, pero por lo general se puede lograr los objetivos.

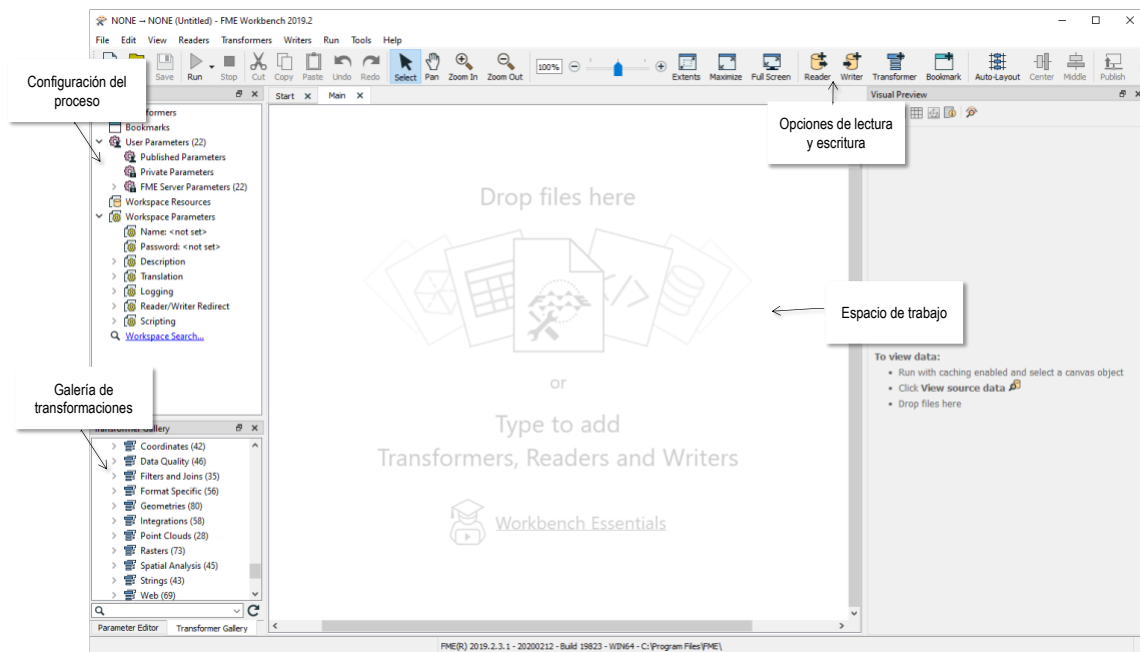


Ilustración 42. FME Workbench es un ambiente de diseño y ejecución de procesos ETL espaciales con la mayor cantidad de operaciones de transformación y formatos de lectura y escritura disponibles en el mercado actualmente. FME 2019.2.

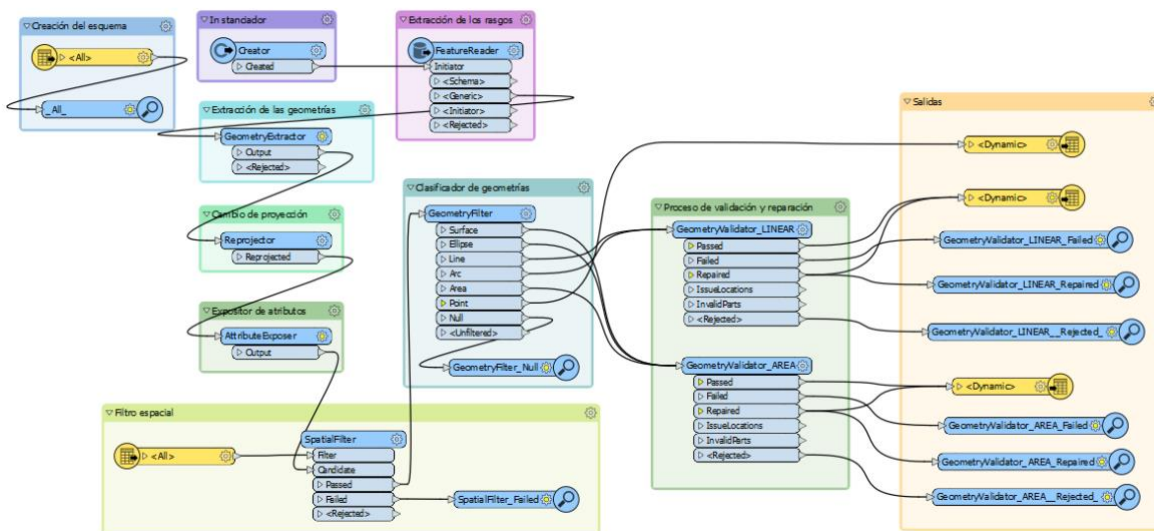


Ilustración 43. Ejemplo de un proceso ETL, en FME.

Sin embargo, hay algunos programas **GIS** que no poseen estas capacidades de automatizar a través del diseño de un flujo, un proceso **ETL**. Ello no significa que no pueden realizar procesos de este tipo, sino que simplemente lo harán paso a paso, manualmente con el software.

En la ilustración anterior podemos apreciar un ejemplo de un proceso **ETL** que realiza algunas transformaciones interesantes, pero que primeramente está diseñada para “leer” fuentes masivas de

datos y escribirlas en un repositorio *Geopackage*, después de haber sufrido el proceso completo. Veamos qué hace:

1. Lee un conjunto de datos de diferentes clases de rasgos.
2. Para los elementos de cada conjunto, extrae la geometría.
3. Cambia la proyección.
4. Verifica en un proceso de filtrado espacial, que los datos se encuentran dentro del área de interés.
5. Si lo están, entonces por sus geometrías son clasificados en elementos puntuales, lineales o de área.
6. A los elementos lineales y de área se le somete a una validación y en su caso corrección geométrica. Los elementos puntuales no son validados.
7. Los elementos válidos y los reparados son enviados a repositorios *Geopackage* en función de su tipo de geometría.
8. Los elementos no reparados o rechazados son reportados como inválidos, con información de la causa.

Es un ejemplo que permite ilustrar que independientemente de la herramienta se puede simplemente paso a paso diseñar un proceso **ETL**, también se puede describir gráficamente de forma genérica.

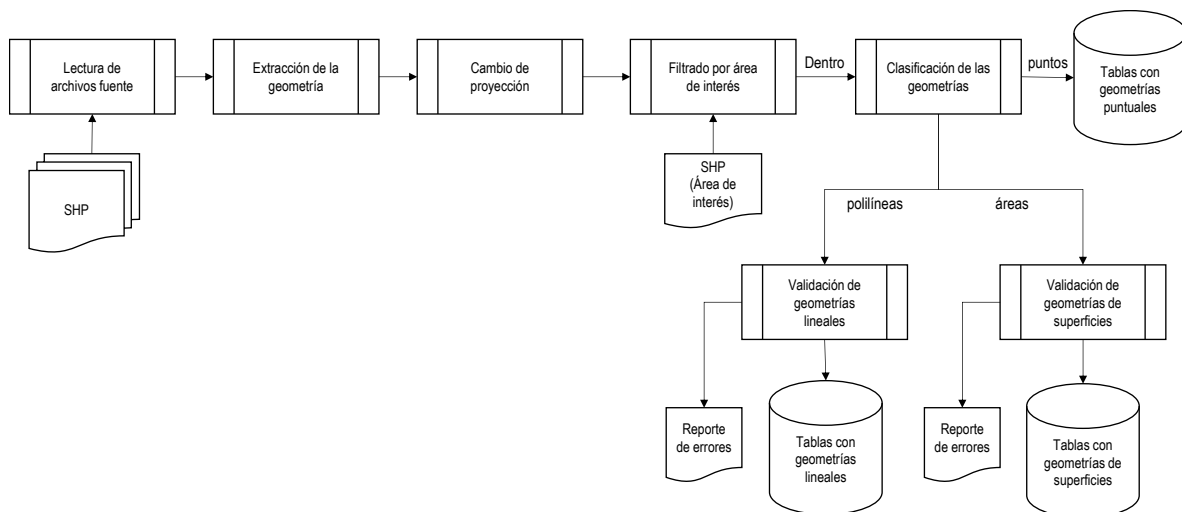


Ilustración 44. Flujo equivalente al de la ilustración anterior, pero presentado de forma “genérica” es decir no dependiente de ningún ETL o GIS en espacial.

Escribir en prosa y diseñar de forma genérica un proceso **ETL** es conveniente porque permite hacerlo y posteriormente encontrar la mejor herramienta que puede resolver este proceso. Además, desde la perspectiva de las buenas prácticas, esto permite mantener documentado el proceso.

Recomendación:

Es recomendable diseñar primeramente el proceso **ETL** espacial y luego implementarlo en la plataforma o herramienta más conveniente.

Ejecución del proceso ETL

Los procesos **ETL** espaciales pueden diseñarse para ejecutarse de forma discrecional, es decir cuando son necesarios según el especialista o pueden implementarse como procesos que se ejecutan de forma recurrente.

fme_feature_type_name	fme_format_long	numOIG	geometry1	EPSG	xmin_min	ymax_max	xmax_max	ymin_min	attribute_0_fme_data_type	attribute_0_name	attribute_0_native_data_type	attribute_1_fme_data_type
BOMBEROS	OGC GeoPackage	1	point	26914	476118.7376	2138090.025	476118.7376	2138090.025	fme_varchar(50)	CLAVE	text(50)	fme_varchar(1)
CENTRO_CULTUR	OGC GeoPackage	22	point	26914	479089.0287	2140285.337	480864.5004	2138314.206	fme_varchar(50)	CLAVE	text(50)	fme_varchar(50)
CLINICAS_IMSS	OGC GeoPackage	42	point	26914	469321.4891	2159747.778	495653.6809	2131868.488	fme_int32	OBJECT ID	mediumint	fme_int32
CLINICAS_ISSSTE	OGC GeoPackage	43	point	26914	468760.9855	2154249.446	500485.9224	2122266.878	fme_int32	OBJECT ID	mediumint	fme_int32
CRUCERO_SATURACION_VEHICULAR	OGC GeoPackage	25	point	26914	474671.0063	2145068.325	480821.5802	2136361.107	fme_varchar(50)	CLAVE	text(50)	fme_varchar(50)
EST_SERVICIO	OGC GeoPackage	27	point	26914	473526.5671	2144717.434	480451.3441	2136094.097	fme_varchar(10)	CLAVE	text(10)	fme_varchar(1)
HOSPITAL	OGC GeoPackage	31	point	26914	472796.1873	2145178.645	481854.0493	2136894.09	fme_varchar(50)	CLAVE	text(50)	fme_varchar(50)
HOSPITALES_IMSS	OGC GeoPackage	28	point	26914	469243.8071	2154574.954	494342.6292	2133464.694	fme_int32	id	mediumint	fme_varchar(254)
HOSPITALES_ISSSTE	OGC GeoPackage	8	point	26914	479635.1364	2154351.576	500551.9089	2140550.508	fme_int32	id	mediumint	fme_varchar(254)
HOSPITALES_MILITARES	OGC GeoPackage	4	point	26914	477053.5846	2149462.839	486844.9956	2136683.986	fme_int32	id	mediumint	fme_varchar(254)
HOSPITALES_PEMEX	OGC GeoPackage	2	point	26914	477089.326	2153920.913	478995.0901	2135061.53	fme_int32	id	mediumint	fme_varchar(254)
HOSPITALES_PRIVADOS	OGC GeoPackage	41	point	26914	470333.196	2155235.119	488964.4516	2133749.069	fme_int32	id	mediumint	fme_varchar(254)
HOSPITALES_SS_FEDERAL	OGC GeoPackage	15	point	26914	478441.5942	2154178.728	486456.8325	2132769.46	fme_int32	id	mediumint	fme_varchar(254)
Metrobus	OGC GeoPackage	4	point	26914	479737.5288	2137797.331	480424.1504	2134690.741	fme_varchar(50)	Nombre	text(50)	fme_varchar(50)

Ilustración 45. Ejemplo de un reporte de los resultados de un proceso ETL espacial.

Los procesos recurrentes suelen definirse cuando se implementan soluciones tipo **IDE** (infraestructuras de datos espaciales) en los que las fuentes de datos son dinámicas o cuasi dinámicas, es decir cambian periódicamente, y es necesario emplearse en cierta plataforma.

Soluciones como *ArcGIS Server* y *M.App*, tienen la capacidad de definir y ejecutar “geoprocesos” tipo **ETL** espacial. *FME Server* es una solución centrada en resolver este tipo de problemas.

Aunque se ejecuten de forma discreta, es decir se define o diseña un proceso **ETL** espacial para resolver una necesidad concreta que no será periódica o que sea uno definido para ser ejecutado recurrentemente es importante evaluar constantemente los resultados y en su caso realizar mejoras al proceso o cambiar la fuente de datos.

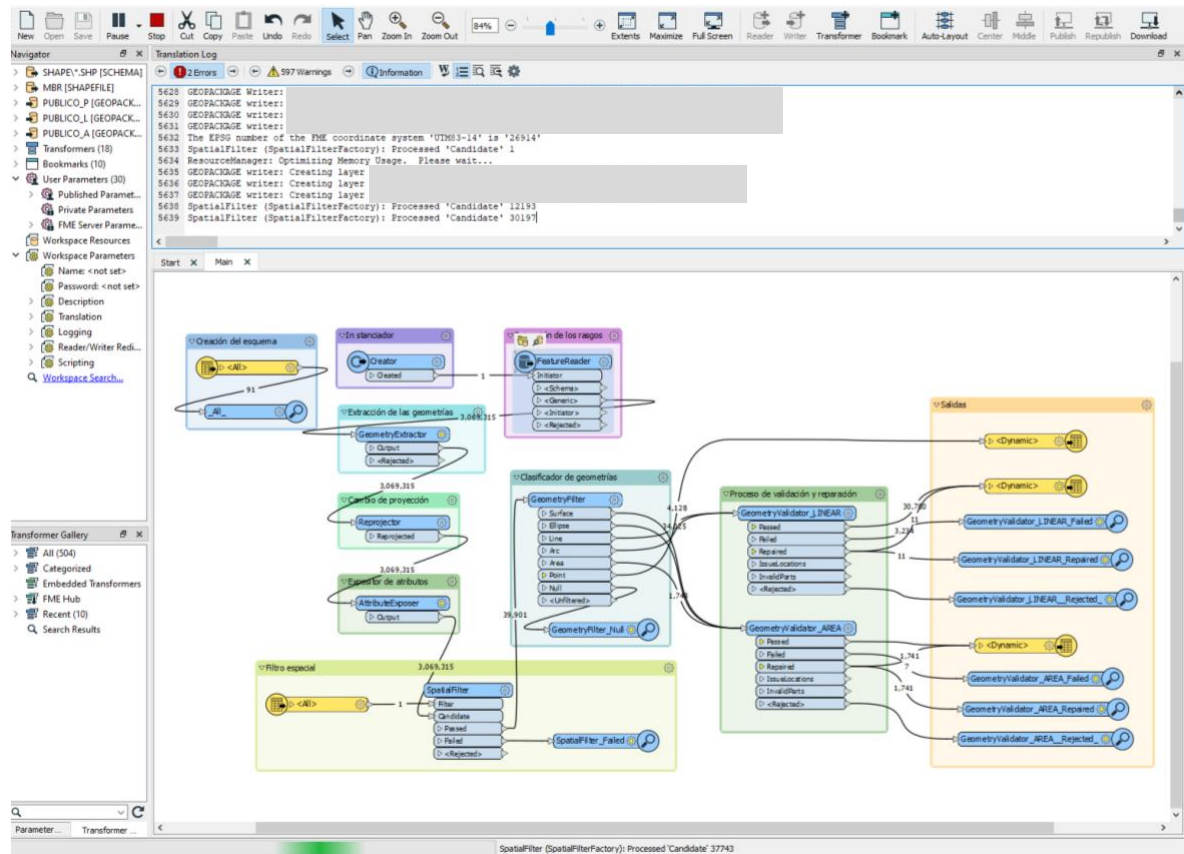


Ilustración 46. Una "instantánea" del proceso¹⁷ de ejecución de un proceso ETL espacial con FME 2019.2.

Otro aspecto importante que tiene un impacto importante en el tiempo de ejecución de los procesos **ETL** es eficiencia, es decir que tan rápido ejecuta un proceso completo. La estrategia del proceso **ETL** debe considerar este factor, sobre todo si son procesos para conjuntos grandes de datos o recurrentes.

¹⁷ Se ocultó cualquier referencia a la fuente de datos para proteger los derechos de autor de las fuentes empleadas.

El estado del arte en los SIG¹⁸

Desarrollo de los SIG

1964-1999

Veremos los **SIG** y no solamente los **ETL** espaciales porque los **SIG** contemporáneos pueden en gran medida realizar las tareas de un **ETL** espacial y además poseen algunas características que las hacen más flexibles. Una plataforma como *ArcGIS Enterprise* o *Geomedia Web Map* o *M.App Enterprise* o incluso *GeoServer*, pueden realizar procesos **ETL** automatizados tipo *FME Server*, quizás con un menor nivel de funcionalidades o capacidades, pero pueden en gran medida resolver la mayor parte de las necesidades.

Veamos un poco la evolución de los **SIG** desde la década de los años 70 hasta nuestros días. Para ello necesitamos entender que el concepto de **SIG** es de finales de la década de los años 80 del pasado siglo, antes simplemente se referían a la cartografía automatizada. La cartografía automatizada nace como una evolución natural de los sistemas de diseño por computadora porque fueron los primeros sistemas capaces de crear, visualizar y modificar geometrías vectoriales y del desarrollo de los programas de visualización y tratamiento de imágenes, principalmente en el ámbito militar.

En función de las fuentes, encontrarán diferentes versiones sobre la historia de los SIG. Por ejemplo, una de estas fuentes la *“Encyclopedia of Information Science and Technology”* en su capítulo *“Geographical Information Systems: the past, present and future”* (Remoaldo, Ribeiro, Lopes, & Silva, 2017) fija como el primer sistema de información geográfica en 1964 en Canadá con el *“Canada Geographic Information System”* creado por Tomlinson y un año después la creación de SyMap en el *“Laboratory for Computer Graphics”* en Harvar en 1965. En estricto sentido, ambos no pueden ser bajo la definición posterior considerados como SIG, sino como planteamientos de procesos de cómputo de representaciones de mapas, fundamentalmente orientados hacia la planeación. Este punto de vista tiene su sustento en el desarrollo tecnológico del momento. En el entorno de los años 1964-1965, no existía lo que llamamos hoy cómputo gráfico. Ni los equipos (hardware) ni los dispositivos de entrada y salida (fundamentalmente los de visualización) poseían la madurez necesaria. El principal promotor del desarrollo tecnológico que terminó en la creación de lo que llamamos cómputo gráfico fue la **NASA**. Aunque ya empleaban computadoras para los cálculos y el manejo de partes, sus representaciones gráficas fueron logradas hacia finales de la década de los 60 por **IBM**, como contratista del proyecto *Apollo*.

No significa que *SyMap* y el proyecto canadiense no fuesen centrados en el uso de la representación de mapas. No fue hasta la introducción del microprocesador y el desarrollo de nuevo equipo hacia principios de los años setenta (quizás un poco antes entre los años 1968-69), que se dieron las condiciones.

¹⁸ SIG: Sistema de información geográfica.

El valor de estos proyectos no fue realmente tecnológico sino conceptual porque permitieron la formación de un grupo de especialistas que después impulsaron lo que llamamos hoy GIS. Jack Dangermond, del grupo de Harvard fundó **ESRI** en 1969 (no era realmente una empresa de software en su inicio) y otros en posiciones públicas y académicas empezaron a impulsar la necesidad del uso de mapas digitales para las labores de planificación. En 1973 se implementaron las primeras soluciones prácticas de automatización cartográfica¹⁹ (*Automated Mapping*), una en Nashville (Weisberg, 2008) y la otra en Maryland (Remoaldo, Ribeiro, Lopes, & Silva, 2017).

A partir de los primeros años de la década siguiente (i.e. 1982) que ESRI crea su primer producto software en 1982 *Arc/Info* (ESRI) y *ERDAS* (ERDAS), en 1985 *MapInfo*, en 1982 *IGDS AM/FM* (Intergraph), 1989 *MGE* (Intergraph) y entre ellos algunos más seguramente, no sólo en los EUA sino en todo el mundo.

Lo que permitió que esto ocurriese en ese momento histórico fue el desarrollo de las estaciones trabajo (workstations) y el cómputo personal (PC), ambos basados en el desarrollo de procesadores de 32 bits (los primeros) y 16 bits (para los segundos).

En esa época se hacía distinción de tres clases de soluciones **SIG**: los que se centraban en la necesidad de crear la base de la información territorial a detalle y el diseño de la infraestructura (**AM/FM**, *Automated Mapping/Facility Management*), los que se aplicaban a los temas de planeación, ordenamiento territorial y gestión de recursos naturales (se denominaban en esa época **SIG**) y aquellos que se destinaban a la creación de los datos en sus etapas iniciales, en este último grupo podemos incluir el desarrollo de las soluciones para la percepción remota.

Muchas de esas soluciones, hasta finales de la década siguiente (90) empleaban a las soluciones **CAD** como base de forma explícita (*MGE, Microstation Geographics, Autodesk Maps*, etc.). Estos se destacaban fundamentalmente por la riqueza de opciones de creación y modificación de los trazos, en contraposición con las soluciones como *Arc/Info* que se centraba en las capacidades de temáticas y analíticas. De ahí que usualmente hasta inicios de la década del 2000 era común encontrarse con organizaciones tuviesen soluciones **SIG** centrados en la resolución de funcionalidades específicas, más que plataformas unificadas.

Hacia finales de la década de los 90 del pasado siglo ocurrieron algunos avances tecnológicos que permitieron el desarrollo de los **SIG** como los conocemos hoy, en prácticamente todos sus aspectos:

- a. La introducción de Internet.
- b. El desarrollo de sistemas operativos de 32 bits para uso común: Windows NT y 95.
- c. El uso civil de la constelación GPS.

¹⁹ En Europa pudieron existir proyectos similares en esos tiempos, pero el desarrollo tecnológico marca que es poco probable que hubiera aplicaciones concretas antes de estas que se señalan. Estas parecen ser las pioneras.

- d. La popularización de la programación orientada a objetos.
- e. La introducción de la fotogrametría digital en todo el proceso, desde la toma de los pares hasta la obtención de los mapas.
- f. La entrada en uso de los satélites civiles de percepción remota de alta resolución.
- g. La introducción de la tecnología digital al mundo de la topografía y la geodesia.
- h. La fundación del Open GIS (hoy *Open Geospatial Consortium*).
- i. El desarrollo de los gestores de datos híbridos: relacionales-orientados a objetos con la capacidad de almacenar objetos geométricos²⁰.
- j. Otros.

Básicamente lo anterior define lo que podemos llamar la consolidación de la convergencia digital, que desencadenó la necesidad de que los SIG, tanto vectoriales como para la percepción remota.

Productos como MapInfo, ArcView y Geomedia en la línea de soluciones SIG de escritorio fueron los pioneros en la introducción de algunos conceptos importantes:

- a. **MapInfo**²¹, su concepto de uso personal y orientado a usuarios no especializados con funcionalidades prácticas. Orientado hacia el usuario poco experimentado.
- b. **Geomedia**²², introdujo el concepto de la abstracción de los procesos de las fuentes de datos con la popularización del concepto de interoperabilidad y la capacidad de usar fuentes de datos diversas sin modificar sus formatos, proyecciones, etc. Orientado al profesional.
- c. **ArcView**²³, un jugador que tecnológica ni conceptualmente aportó nada significativo, pero implantó en la comunidad de especialistas en recursos naturales y planeación, la idea de que podrían usar una herramienta de software de “bajo costo” para usar sus datos. Orientado a un usuario ubicado entre el poco experimentado y el profesional.

²⁰ Oracle, Informix e IBM fueron los pioneros en la introducción del concepto de base de datos espacial, aunque el primero fue el que lo realizó con mayor éxito con la introducción de un modelo relacional puro para las versiones 7, 8 y 9 de su gestor y la adopción del nuevo modelo orientado de objetos en una liberación tardía de la versión 9. Con la versión 10, ya no existía rastros del modelo de almacenamiento de datos geográficos bajo un esquema relacional puro.

En 1996 Intergraph implementó la capacidad de almacenar geometría como BLOB en MS Access (mdb) para Geomedia, buscando usar este repositorio como base de datos personal. Posteriormente ESRI optó ese camino con el Personal Geodatabase, también empleando MS Access (mdb).

²¹ Este producto definió el concepto “uso personal del SIG” y el formato Map/DAT. Este formato inspiró el formato SHP (shp, dbf) al ser el archivo MAP el antecesor del SHP y el DAT es un archivo DBF en gran medida, al menos en sus inicios.

²² El autor fue el primero en usar Geomedia en América Latina cuando trabajó en la subsidiaria mexicana de Intergraph. Fue parte del programa para la definición y mejoras de las versiones 2 a la 4 de la solución, trabajando con el equipo de Hustville, Alabama, EUA.

²³ ArcView fue el producto que implementó el formato SHP. Es interesante que en sus primeras versiones no existiese forma de que Arc/Info y ArcView pudiesen interoperar a ningún nivel. Ni el primero soportaba las coberturas ni el segundo los archivos SHP.

En ese mismo período nació la idea del uso de la información en la Web: *MapView* en 1993 (*Xerox*), *MapGuide* 1995 (*Argus Technologies*), *Geomedia WebMap* 1996 (*Intergraph*), *MapObjects Internet Map Server* (*ESRI*), etc.

En ese período de la historia del desarrollo de los SIG se lograron avances importantes en los siguientes puntos:

- a. La sistematización del proceso de producción cartográfico con la introducción de la aerofotogrametría digital.
- b. La creación de nuevos métodos de adquisición de datos geográficos, como la de las imágenes de satélite, cámaras digitales y sensores laser.
- c. El desarrollo de técnicas para el tratamiento de imágenes.
- d. La generación de modelos triangulares a partir de la altimetría vectorial (curvas de nivel).
- e. La definición del “modelo topológico” y sus operaciones.
- f. La creación del álgebra de mapas.
- g. La transición de las plataformas “Main Frame” hacia las estaciones de trabajo y al final hacia el cómputo personal, permitiendo la diseminación y masa crítica en el uso de los SIG.
- h. La introducción del concepto de mapas en internet.

Así como muchos otros.

2000-2019

Hacia el año 2000, desde el punto de vista tecnológico, podemos afirmar que el 80% de lo que hoy podemos apreciar ya se había inventado. Este período es realmente un período de evolución, mientras que el anterior fue realmente de una revolución conceptual y científica.

A partir del nacimiento de gigantes tecnológicamente muy proactivos como es el caso de Google y su crecimiento increíble en la primera década principalmente pudimos observar el nacimiento del concepto de servicios gratuitos de mapas o información geográfica en el 2005 (aunque no fue Google, sino la rusa Yandex que lo introdujo antes en el 2004). Google pudo posicionarse como líder en ese servicio a partir de la adquisición de Keyhole en el 2005²⁴.

²⁴ Los servicios de mapas por internet ya existían desde por lo menos el año 1999-2000 con servicios ofrecidos como por ejemplo la empresa MapQuest.

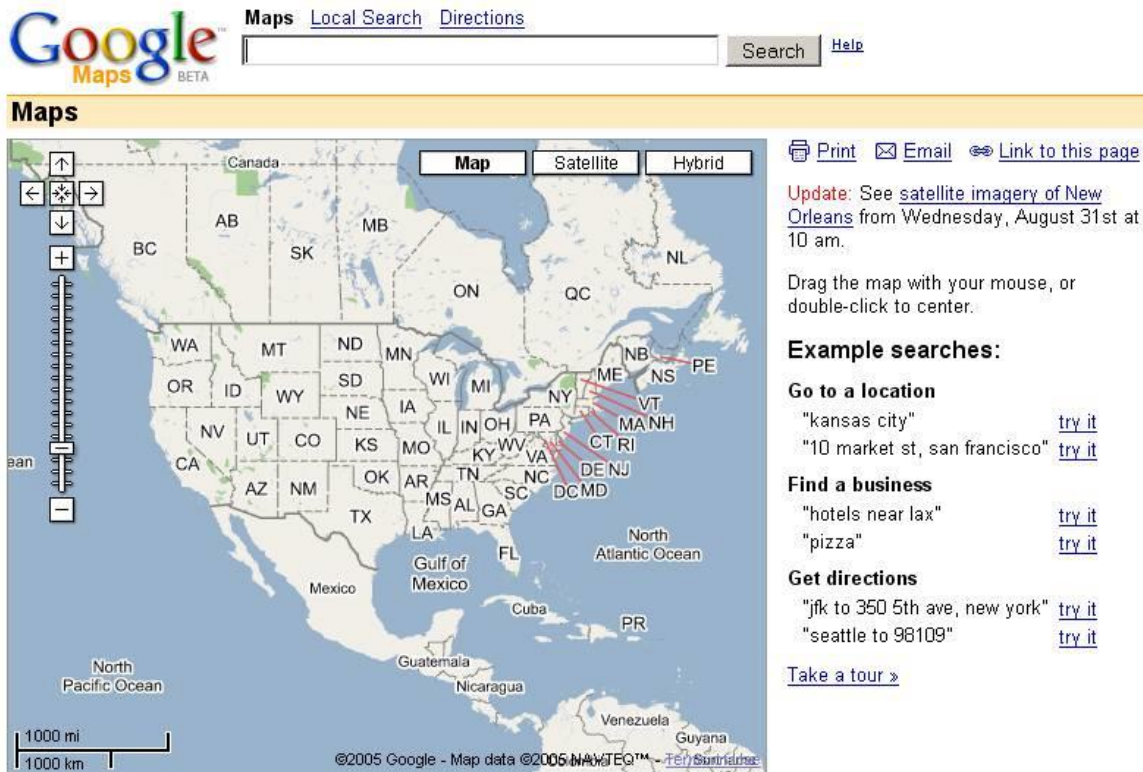


Ilustración 47. Así se veía la primera versión del servicio de Google Maps en el año 2005.

La introducción de los “dispositivos inteligentes” impulsó la necesidad de que estos servicios fuesen eficientes y convirtieron a los usuarios en “fuentes de facto” de información a partir, sobre todo, de la introducción del primer dispositivo telefónico inteligente con GPS²⁵.

Otro aspecto fue el desarrollo de la visualización 3D, con características dinámicas, a partir del desarrollo de la tecnología de procesamiento necesarios (procesadores gráficos y las especificaciones OpenGL y WebGL) como una consecuencia de la industria de los juegos, cada vez más realistas. Este desarrollo también ha conducido a la introducción de la consideración temporal como componente de la información geográfica. Luciad (ahora parte de Hexagon Geospatial) ha sido un jugador disruptivo con el desarrollo de tecnologías que permite la visualización dinámica de datos en lo que ellos llaman cuatro dimensiones (4D + tiempo).

El desarrollo (no necesariamente surgimiento) de los proyectos de código abierto ha permitido que instituciones y especialistas que no tienen acceso a licenciamiento comercial puedan contar prácticamente con las mismas funcionalidades, tanto para las soluciones de escritorio como en la Web.

Aunque algunos productos habilitaron a partir de WFS-T o algún mecanismo propietario la edición o incluso la creación de geometrías en los clientes ligeros (navegadores Web), ninguno de estos ha logrado

²⁵ Desde mediados de los noventa ya se podían encontrar dispositivos con GPS, pero eran extraordinariamente costosos y se usaban principalmente para tareas especializadas.

la calidad y seguridad en el proceso, ni las funcionalidades necesarias, como para considerarse plataformas confiables para la creación y mantenimiento de la cartografía. Las limitaciones de los protocolos Web las preocupaciones por la seguridad de los datos de los clientes han conducido a una cierta calle sin salida. La excepción ha sido, por ejemplo, la aproximación de Hexagon, con Geomedia Smart Client, al considerar que no es el navegador, sino a través del empleo de un cliente Java, desplegándose un entorno que permite emular las funcionalidades de un SIG de escritorio, con mecanismos que permiten garantizar la integridad de los datos espaciales aún condiciones de comunicaciones adversos.

El almacenamiento de la información geográfica en repositorios en lugar de emplear archivos (filebased) como gestores de datos y bases de datos personales ha sido otro aspecto que ha tenido un impulso importante. Microsoft introdujo la capacidad de almacenar datos espaciales desde la versión 2008 R2 de SQL-Server, PostgreSQL a través de PostGIS también incluyó esta capacidad, así como otros gestores, sobre todos de código abierto. En cuanto al almacenamiento de datos a nivel personal Geopackage (implementado sobre SQLite) es un buen ejemplo, aunque su intención inicial fue para portar datos a dispositivos móviles fundamentalmente.

A pesar de que la información espacialmente habilitada (o geográfica) es hoy parte de casi cualquier aplicación, ya sea porque provee una posición o porque emplea los datos espaciales para realizar algunas tareas, desde la perspectiva del conocimiento y la innovación tecnológica, no ha habido tantos avances como entre 1980 a 1999. Aún conceptos como el de teselas (tiles) ráster y vectoriales, fueron empleados en la práctica a partir de la necesidad de entregar mapas ráster por medio de servicios WMS, WMTS, WFS o WFST, los algoritmos iniciales fueron creados antes del 2000.

Situación actual

OSGeo

Open Source Geospatial Foundation o OSGeo es una organización que coordina varios proyectos de código abierto enfocados hacia el uso y visualización de la información geográfica. Estos proyectos no incluyen la creación de los datos a partir de procesos de tipo aerofotogramétricos.

Los proyectos OSGeo son sumamente interesantes, pero cuentan con un alto nivel de redundancia, es decir varios de ellos tienen objetivos y funcionalidades similares, pero son totalmente independientes, así MapServer y GeoServer pueden resolver los mismos problemas, o gvSIG y QGIS son soluciones equivalentes en buena medida, aunque GeoServer y QGIS son los mejores proyectos en cada uno de su clase por su alto nivel de madurez.

Soluciones de escritorio

QGIS

Es quizás la mejor opción de solución SIG de escritorio de código abierto disponible. Es una solución con un alto nivel de madurez, una riqueza funcional equivalente a los productos comerciales y además cuenta con una comunidad de desarrolladores de funcionalidades adicionales (plugin) importante. Integra muy bien las capacidades vectoriales y las ráster, con funcionalidades logradas por medio de los plugin. Es capaz de leer una enorme variedad de formatos empleando, principalmente la librería GDAL/OGR.

Existe un proceso constante de mejora en QGIS, y para aquellos que lo han usado en diferentes momentos de su evolución se habrán percatado de sus mejoras constantes. Posee un excelente entorno de desarrollo de adiciones mediante Python.

Su principal desventaja es precisamente lo que parece una fortaleza, dado que muchas de sus funcionalidades más avanzadas se logran a partir de plugin de terceros, no siempre son estables ni poseen una filosofía de usabilidad uniforme. Sin embargo, integra, si lo desean instalar, a GRASS, pero su utilidad es limitada por ser una plataforma diseñada por especialistas y para especialistas, hace casi cuarenta años y que ha evolucionado a partir de su creación por parte de Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EUA hasta su mantenimiento actual principalmente en Italia.

Sin duda es la mejor opción de solución de escritorio en el mundo del código abierto.

gvSIG

Este es un proyecto interesante que inició con la Comunidad de Valencia y cuenta o contó con financiamiento de la Unión Europea. Es una solución construida con Java y fue un jugador dominante en el mundo de los SIG de código abierto hasta que QGIS maduró y le arrebató esa posición.

Su fortaleza radica en que fue construido pensando en su portabilidad, pero a la vez fue uno de sus principales limitaciones, sobre todo en la forma en que fue implementada, abstrayéndose de la infraestructura y en consecuencia nunca fue tan estable ni eficiente.

Hoy día es un producto en declive, aunque en el año 2019 se liberó la versión 2.5.

Soluciones servidores

MapServer

Es una plataforma de publicación de mapas que nació a finales de la década de los 90 del siglo pasado. Está fuertemente vinculado a PHP (como medio de personalización y programación) e incluso aún puede emplearse empleando CGI.

El aspecto interesante de este producto radica en que su evolución inicial está vinculado a la definición de WMS.

Por su arquitectura es un producto que no debe considerarse en implementaciones donde la seguridad sea una preocupación.

GeoServer

Este es una especie de servidor de mapas con algunas capacidades de geoprocetos pensado desde sus inicios como una plataforma para ser desarrollada o mejor dicho “armada” por programadores empleando Java.

Es el mejor exponente de su tipo en el mundo de los SIG de código abierto y es sumamente popular. Es, sin duda una mejor opción que MapServer si se desea emplear alguna oferta de este tipo de OSGEO.

ESRI

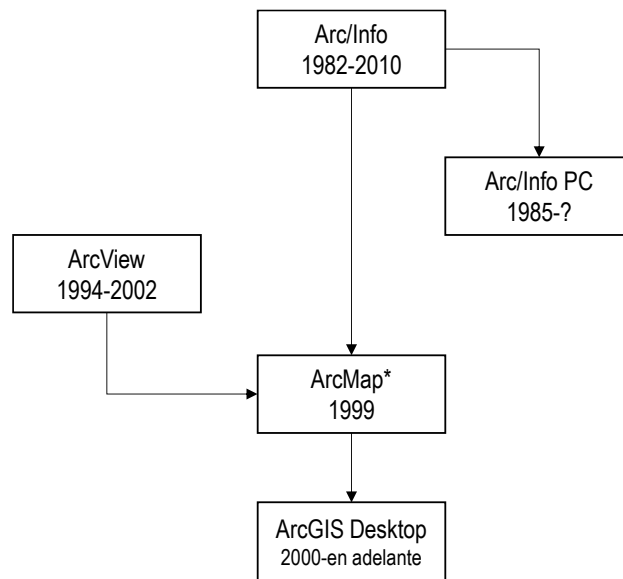
Fundado en 1969, no fue hasta 1982 que la primera versión de Arc/Info fue liberada. Es uno de los pioneros que ahora goza de una posición privilegiada en el mercado y ha sido muy innovador desde sus inicios.

Soluciones de escritorio

ArcGIS Desktop

Es el heredero de dos soluciones, Arc/Info y ArcView. Cuando era ya evidente que el primero se estaba convirtiendo en un producto poco flexible para el mercado de soluciones para Windows, y el segundo no contaba con las funcionalidades necesarias para clasificarse como un SIG. Así en 1999, nace ArcMap, una combinación de algunas funcionalidades de Arc/Info con la usabilidad de ArcView (versión 3).

No fue sino hasta el siguiente año que ArcGIS nace oficialmente y de ahí fue evolucionando. Su principal fortaleza para imponer un nuevo producto con el éxito con el que lo han logrado es la base de usuarios. Este factor incentivó a definir SDE, un intermediario para la gestión de los datos de diferentes fuentes. Desde hace ya unos diez años ESRI no recomienda emplear el modo “propietario” de SDE, es decir, en el que las fuentes son modificadas para sólo ser accesibles a partir de productos que emplearan a algún tipo de cliente de este componente.



*No confundir con ArcMap como módulo interno del actual ArcGIS.

Ilustración 48. Evolución de las soluciones de escritorio de ESRI.

ArcGIS es un producto profesional, muy respetado, y con capacidades que pueden ser adicionadas para cumplir objetivos específicos: edición de cartas náuticas, gestión de caminos, modelos hidrológicos, etc.

Aunque soporta formatos ráster, sus funciones no son a los niveles de los productos especializados. Por ello, desde el año 2007 promueven a ENVI en lugar de ERDAS Imagine como complemento para la percepción remota profesional.

Su capacidad de interoperación con formatos que no son de ESRI o abiertos, los resuelve empleando la librería de FME (con algunas limitaciones), por lo que desde la versión 9 es capaz de leer una buena variedad de formatos.

Posee un modelador visual de geo-procesos que fue implementado a semejanza del que empleaba ERDAS en su momento, de ahí que pueden automatizarse algunas tareas a partir de la versión 9.0, cuando ya no contaba con la colaboración de ERDAS.

ArcGIS Server

El primer producto servidor de ESRI fue ArcIMS (*Arc Internet Map Server*) cuya primera versión disponible fue la 3.0 en el año 2000 y su última versión, la 10, fue liberada en el 2010. Muchas fuentes plantean que ArcGIS Server es un “rebranding” de ArcIMS. En parte pudo haber una idea unificadora para establecer la estrategia en una marca (ArcGIS) con dos productos para ambientes diferentes.

Sin embargo, ESRI aprovechó para redefinir el producto servidor para ir transitando hacia las características más contemporáneas como el procesamiento en línea de información geográfica (*online geoprocessing*) y el empleo de técnicas más seguras de personalización y desarrollo de aplicaciones

clientes sin necesidad de interactuar directamente con los objetos del servidor, mediante, principalmente el empleo de servicios Web.

Servicios en la nube

ArcGIS Online

Es el servicio en la nube de ArcGIS, con algunas limitaciones en cuanto al volumen, capacidades de geoprocetamiento y personalización o integración a sistemas corporativos.

Hexagon Geospatial

Es una empresa del conglomerado Hexagon que se ha especializado en la metrología. En el año 2010 compró Intergraph Corporation y antes había comprado a Leica Geosystems que a su vez había comprado a ERDAS. En el año 2017 Hexagon compró a Luciad, integrándolos todos en Hexagon Geospatial.

La compra de estas empresas le permitieron a Hexagon ganar décadas de experiencia, un portafolio de productos y tecnología y una cartera de clientes, pero también a acarreado un serio problema de integración tecnológica e identidad de sus productos.

De intergraph, Geomedia y su familia de productos, así como las soluciones fotogramétricas (cámaras digitales y programas) fueron integradas (las cámaras a Hexagon Geosystems). De ERDAS, Imagine y Apollo fueron junto con el formato ECW y ER Mapper. De Luciad se integraron las tecnologías 4D a partir de Luciad Lightspeed, Luciad Fusion y Luciad RIA.

Soluciones de escritorio

Geomedia Desktop

Geomedia fue la primera solución SIG que implementó el concepto moderno de interoperabilidad a nivel de las fuentes de datos.

A principios de los años noventa del siglo pasado, Intergraph, empezó un proyecto tecnológico denominado Júpiter. Este proyecto tuvo como principales objetivos:

- a. Las computadoras a finales de los años ochenta y principios de los noventa tenían una mayor capacidad de mapear memorias RAM. Intergraph empleaba como plataforma base en ese momento a MicroStation, un CAD de Bentley Systems (una subsidiaria) que a su vez nació como un clon de IGDS (Intergraph Graphical Design System). Ambos fueron muy exitosos porque en lugar de depender del RAM, empleaban los archivos en un proceso de escritura directa. Era evidente que esta estrategia ya no era conveniente y era necesario ingresar a un modelo que hiciera un uso más eficiente de los recursos de las computadoras.
- b. El formato DGN tenía un límite de 32 MB por archivo, por lo que era necesario cambiar la estrategia de almacenamiento de los datos. Este formato, además fue diseñado para “todo uso”,

por lo que era capaz de almacenar casi cualquier tipo de elemento geométrico, pero esta ventaja era una limitación para usos específicos, dado que introducía un elemento de complejidad.

- c. Para Intergraph era importante separar los datos de su representación.
- d. Era evidente que otros fabricantes de software empleaban formatos que los clientes necesitaban acceder de forma nativa, sin necesidad de un proceso de “importación”, porque inevitablemente podían ocurrir cambios indeseados.
- e. Aunque MicroStation era una plataforma de edición 3D, lo era para arquitectura e ingeniería civil fundamentalmente. Carecía de la agilidad para hacer modelado mecánico, entre otras razones por la limitación que MicroStation tenía al tener que escribir en todo tiempo al archivo para mantener un uso reducido de memoria RAM.
- f. La arquitectura de MicroStation requería que los programas tuvieran que ser codificados dentro del ambiente de este empleando, principalmente, un lenguaje tipo C denominado MDL. Esto implicaba la necesidad de programadores que dominaran a este lenguaje con maestría y un conocimiento de la arquitectura del motor CAD.
- g. Para el mundo SIG era necesario un ambiente menos “sobrecargado” y capacidades de leer y acceder a datos de forma directa de proveedores, sin necesidad de modificarlos (referirse al tema de calidad de datos).
- h. Bentley Systems e Intergraph estaban a punto de separarse, por lo que este último necesitaba contar con una alternativa propia.

Lo anterior condujo a principios de 1994 del proyecto que posteriormente se convirtió en Geomedia. Al inicio los problemas fueron enormes por la falta de madurez de los ambientes de desarrollo sobre Windows (Intergraph estaba abandonando CLIX – su versión de UNIX), específicamente las versiones de los compiladores de C, C++ y VB. Otro problema fue ODBC, aunque parecía una buena idea, nunca alcanzó la versatilidad necesaria para considerarse como un mecanismo de conexión fiable.

Una vez que se resolvieron estos inconvenientes se pudo desarrollar Geomedia. Lo que lo hizo único fueron las siguientes características (en 1996):

- a. La abstracción entre los datos y los procesos (visualización, análisis, representación topológica, etc.) mediante un concepto novedoso el GDO (Geographical Data Object), idea que nació a partir de la idea de ADO (Access Data Object) de Microsoft. Esta visión, orientada a objetos, permite representar de forma uniforme cualquier tipo de fuente de datos, tanto tabular como geométrica.
- b. La capacidad de representar cualquier fuente en una proyección cualquiera sin necesidad de modificarla en la fuente (Reprojection on the Fly). La misma arquitectura GDO, integró la representación espacial, su proyección y marco de referencia. Una vez que los datos son

“alimentados” la instancia GDO conoce incluso el algoritmo (transformación geográfica) más conveniente para representarlos en el mapa.

- c. Almacenar las consultas como “reglas o definiciones” y no como subconjunto de datos. Introdujo este concepto para permitir que cada vez que los datos fuesen modificados, los resultados de una consulta fuesen actualizados inmediatamente.
- d. Conexiones a bases de datos espaciales de forma nativa. Geomedia fue el primer SIG en hacer un uso del concepto de que los datos deben ser accedidos de forma nativa, sin el uso de intermediarios, por lo que abandonó la idea RIS (Relational Interface System) que usó anteriormente con productos como MGE, FRAMME y otros para acceder de forma “abstracta” a gestores de datos externos.

ERDAS Imagine

Sin dudas la solución profesional para la percepción remota (en ambiente de escritorio) con mayor prestigio es ERDAS Imagine. Fue además el primer producto comercial en su género (1982 lanzándose en su primera versión simplemente con el nombre de ERDAS).

Introdujo el concepto de flujo de trabajo en el mundo de los SIG con Spatial Modeler en su versión 8.x e incluso definieron un lenguaje denominado Spatial Modeler Scripting Language.

Es una solución muy consistente para las labores de percepción remota, modelado digital de elevaciones y fenómenos relacionados con ello, LiDAR, fotogrametría digital (con módulos adicionales), es decir es una plataforma muy profesional para labores relacionados con los SIG “no vectoriales”.

Soluciones servidores

Geomedia Web Map

Lo que hoy es Geomedia Web Map fue en sus inicios y hasta el año 1999, en realidad un producto para publicar y hacer análisis en la Web que no guardaba relación alguna con Geomedia (desktop) más que en su nombre. Inicialmente empleaba CGI/Perl y posteriormente (1999) se convirtió en la contraparte Web de Geomedia.

Entre las diferencias iniciales con respecto a sus competidores fue la conceptualización del empleo de mapas vectoriales a través del empleo de ActiveCGM, mucho antes de la definición de WFS, para poder incorporar, quizás de forma ingenua, la capacidad de realizar operaciones de edición desde un navegador, pero no tuvo ningún éxito por muchas razones, entre ellas por las limitaciones del protocolo de internet y la seguridad de las conexiones.

Otro aspecto interesante fue que inició con el concepto de Web GIS en vez de simplemente una solución de visualización de mapas por internet, introduciendo capacidades análisis parecidas a las ofrecidas en su contraparte de escritorio.

Hoy sigue empleándose, aunque Hexagon está más interesado en que M.App Enterprise se convierta en su heredera.

Geomedia Smart Client

Es una solución innovadora que se creó a partir de un esfuerzo de una pequeña empresa Austriaca que entre 2008-2010 implementó el concepto de edición cartográfica desde un cliente Java para así resolver los problemas y limitaciones que el modelo Web posee para la edición cartográfica profesional con la inclusión del concepto de bitácora y procesos predefinidos para poder funcionar en un ambiente distribuido.

M.App Enterprise

A raíz de la compra de Luciad por parte de Hexagon en 2017 se inició inmediatamente el planteamiento de crear una plataforma unificada que contemplara las mejores características de este en el sentido de su desempeño y visualización 4D (3D + tiempo).

Incluye tanto capacidades de análisis vectorial como ráster, procesos personalizados (a partir de la experiencia de Spatial Modeler), la capacidad de interoperabilidad y la edición Web al incorporar las funcionalidades de Geomedia Smart Client.

Tiene su versión en la nube en M.App.

Luciad Fusion

Cuando Luciad inició hacia los años 1999 o 2000 como un proyecto de la UE/OTAN como una empresa encubada en la Universidad Católica de Lovaina se centró en la creación de una plataforma SIG para la industria aeronáutica donde la disponibilidad y rendimiento era un factor más importante que las capacidades analíticas.

De este requerimiento nació Luciad Fusion como un servidor, inicialmente, de tesalias ráster de alto rendimiento, equivalente a Google Earth Enterprise, que fue incorporando capacidades mayores a lo largo del tiempo con tesalias vectoriales, servicios proxy de datos, algunas capacidades de procesamiento analítico del lado del servidor, entre otros.

Es interesante hacer notar que Luciad inició empleando Java como su plataforma de ejecución para lograr un alto nivel de portabilidad y aislamiento de los equipos de cómputo, como parte de los requerimientos de la industria aeronáutica.

Librerías y componentes para desarrollo

Luciad LightSpeed

Lucia nace para resolver la necesidad de visualización de la información geográfica en dos y tres dimensiones en la industria aeronáutica en Europa. Lightspeed es una plataforma enfocada a la creación

de aplicaciones complejas en Java que empleen de forma intensiva la visualización de información geográfica.

Aunque incluye una plataforma base (ya codificada) denominada Lucy, en realidad una “caja de herramientas” para construir aplicaciones o sistemas.

Luciad RIA

Luciad RIA es producto de la necesidad de lograr funcionalidades equivalentes que puede ofrecer Luciad Lightspeed al mundo de los navegadores Web. Es por lo tanto una librería JavaScript que funciona en conjunción, principalmente, con Luciad Fusion.

Entre sus características importantes está el que fue la primera en soportar WebGL de forma nativa y HTML 5.

Safe Software

Safe Software es una empresa canadiense fundada por exempleados de Intergraph Canadá que se percataron de que el modelo de Geomedia (GDO, Geographical Data Object) era una idea interesante para implementar un ETL geográfico o espacial. Safe Software creó el concepto de FDO (Feature Data Object) que posteriormente se convierte en un proyecto OSGeo.

Su primer producto fue FME (Feature Model Engine) y posteriormente FME Server, con su contraparte en la nube FME Cloud.

Ejercicios

Las preguntas y ejercicio que a continuación podrán encontrar no son suficientes para repasar y reforzar todo y cada uno de los aspectos que hemos tratado. Estos, sin embargo, fueron incluidos como instrumentos de repaso de los aspectos más importantes. Será necesario que el lector o educando a través de su práctica profesional haga un esfuerzo de aplicación porque no existen documentos docentes disponibles suficientes en estos temas.

Preguntas

Pregunta 1. Se define la escala como el cociente entre una unidad en el mapa y las unidades que representa en la realidad. Así por ejemplo una escala 1:20,000 representa un cm en el mapa es a su vez equivalente a 20,000 cm en el terreno, es decir 200 m.

- a. ¿Cuál de las siguientes afirmaciones es cierta?

	Afirmación	Cierta o falsa
1.	Un mapa a una escala 1:1,000,000 es menos preciso que uno a una escala 1:50,000	
2.	La cartografía edafológica 1:250,000 es suficientemente precisa para emplearse con una a una escala 1:10,000.	
3.	Un ortofotomapa escala 1:100,000 se emplea para levantar rasgos, por ser muy reciente, para ser empleados por un proceso que a su vez tiene como referencia planimetría 1:25,000. Este es un procedimiento válido.	
4.	Un control terrestre cuyos puntos son representados en la cartografía a una escala equivalente a 1:100 son empleados como puntos de control para un modelo que se empleará para realizar una restitución fotogramétrica escala 1:1,000. Este es un procedimiento coherente.	

- b. Para aquellas que consideras falsas, argumente las razones.

Pregunta 2. Las proyecciones cartográficas permiten la representación de una porción de la superficie terrestre en un plano. Menciona las principales propiedades de conservación que pueden o no conservar una proyección cualquiera, considerando el uso para el que esta está destinada.

Pregunta 3. ¿De qué forma impacta la calidad temporal de un dato geográfico?

Pregunta 4. Si nos encontramos con un conjunto de datos cartográficos que representan una red de caminos o vialidades que al revisar se puede observar que existen algunos elementos que poseen las siguientes características.

- No poseen una intersección verdadera, es decir dos caminos se intersecan sin definir un nodo.
- Algunos segmentos cuentan con puntos (nodos) mucho más cercanos entre sí que la exactitud de la fuente de datos.
- Existen algunos segmentos pequeños que se encuentran sobrepuestos a los segmentos mayores.

Indique cuales de estos son errores de naturaleza geométrica y cuáles topológicas.

Pregunta 5. La cartografía catastral de una ciudad de 10 km² sólo cubre el 20% de esta. ¿Cuál de los aspectos de calidad se incumple en este caso?

Ejercicios

Ejercicio 1. Como material complementario en el folder \090020001\ encontrarán una serie de archivos de SHP, SHX, DBF, PRJ, XML y HTML que son parte de la “Información Vectorial de Localidades Amanzanas y Número exteriores Urbana”²⁶ y específicamente para un conjunto de datos perteneciente a esta distribución.

- a. Consulte la metadatos de este conjunto y plantee su linaje, señalando los procesos que han sufrido estos.
- b. Plantee las razones que cree por las que estos datos se ofrecen en el sistema de referencia espacial específicamente.

Ejercicio 2. Un conjunto de datos que ha obtenido y estos se encuentran en un sistema de referencia espacial EPSG 6372. Va a emplear un **GIS** para extraer, transformar y cargar estos datos al repositorio que ya emplea. Sus datos los trabaja en una proyección UTM Zona 15 con un elipsoide GRS80. ¿Cuál tipo de transformación emplearía para el cambio de marco de referencia geográfica? Asuma que su GIS le permite seleccionar el algoritmo que desee.

Ejercicio 3. En QGIS (o en su **GIS** preferido) abra una capa (conjunto de datos) preferiblemente polígonos, que tengan sus coordenadas en grados (geográficas) de una zona que se encuentre en un solo huso UTM. Defina una nueva capa, en **UTM** con el huso correspondiente al conjunto de datos, puntual. Modifique su mapa para que se encuentre correspondiente al sistema de referencia espacial del conjunto de datos. Inserte el punto en un lugar coincidente con un nodo de algún polígono. Una vez realizado, modifique el sistema de referencia espacial de su mapa a que coincida con el de su punto.

- a. ¿Obtuvo alguna alerta de su **GIS** por colocar un punto definido en un sistema de referencia espacial distinto al del mapa?
- b. ¿La relación entre el punto y el nodo de referencia es igual después de modificar el sistema de referencia espacial del mapa para que coincida con el primero?

Recomendación: Emplee preferiblemente QGIS 3.x+.

Ejercicio 4: Calcule las coordenadas **UTM** del punto longitud -99.22765404 grados y latitud 19.35076599 grados, asumiendo que las coordenadas geográficas se encuentran referidos al elipsoide WGS84. No realice un cambio de elipsoide.

²⁶ Podrán encontrarlo en: <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=0710000000000000&ag=01>

- a. Una vez obtenidas las coordenadas **UTM**, calcule nuevamente las geográficas. ¿Son idénticas a las ofrecidas en el ejercicio?

Orientación: Puede alguna calculadora en línea.

Ejercicio 5. Si ha concluido el ejercicio 3: Exponga la razón por la que ya no se emplea la representación “área – centroide” (*area-centroid*) para representar áreas relacionada con los cambios de proyección y marcos de referencia geográficas.

Ejercicio 6. Descargue en <https://www.inegi.org.mx/app/descarga/?ti=13&ag=00> el SCINCE 2010 (edición) 2016. Una vez descargado y descomprimido verifique el contenido y conteste a las siguientes preguntas:

- a. ¿Cuál es la fuente cartográfica empleada como base para la información censal y de qué fechas?
- b. ¿Cuál es la proyección y marco de referencia geográfica, es decir el sistema de referencia espacial, de este conjunto de datos?
- c. Exponga en un diagrama simple la estructura de datos de este conjunto.
- d. Diseñe un proceso ETL para trasladar este conjunto a un formato Geopackage o File Geodatabase, asumiendo que serán empleados para ser consultados vía Web con una solución en ArcGIS Server, GeoServer o equivalente y se desea que el proceso de su consulta sea eficiente.

Lectura recomendada

La lectura recomendada es simplemente aquella que considero necesario que el lector o educando lea o consulte con la finalidad de profundizar. La bibliografía es más rica pero existe en ella documentos o referencias que son de mayor profundidad que la necesaria por ahora pero que para aquellos más interesados será interesante.

1. Un artículo sobre calidad de datos geográficos. Puede encontrar este artículo en ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/40115183_Spatial_data_quality_from_description_to_application.
2. Proyecciones, un libro de referencia aún vigente, de John P. Snyder “Map Projections – A working manual” del “US Geological Survey”.
3. Proyecciones, un texto muy explicativo de Raúl Ángel Gómez Moreno (INEGI) “Guía de proyecciones cartográfica”.
4. Para conocer sobre equipos clásicos de fotogrametría: “Classical Photogrammetric Equipment” que puede encontrar en ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/325425242_Classical_Photogrammetric_Equipme nt.
5. Sobre diseño de repositorio: “Advanced Data Warehouse Design – From conventional to spatial and temporal applications”.

Bibliografía

- Aronoff, S. (1989). *Geographic information systems: a management perspective*. Ottawa: WDL.
- Astriani, W., & Trisminingsih, R. (2015). Extraction, Transformation, and Loading (ETL) module for hotspot spatial data warehouse using geokettle. *Procedia Environmental Sciences*. Obtenido de www.sciencedirect.com
- Berdard, Y., Sonia, R., & Proulx, M.-J. (2006). Spatial On-Line Analytical Processing (SOLAP): Concepts, Architectures and Solutions from a Geomatics Engineering Perspective. *Centre for Research in Geomatics. Laval University*, 17.
- Crampton, J. W. (2010). *Mapping, A Critical Introduction to Cartography and GIS*. Oxford, Gran Bretaña: John Wiley & Sons.
- de By, R. A., Georgiadou, Y., Knipper, R. A., Kraak, M.-J., Sun, Y., & Weir, M. J. (2001). *Principles of Geographic Information Systems. An introductory textbook* (3 ed.). (R. A. de By, Ed.) Enschede: The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Deakin, R. (2004). *A guide to mathematics of map projections*. Melbourne: RMIT University.
- Deakin, R. (2006). *Bursa-Wolf and Molodensky-Badekas Transformation*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/228757515_A_NOTE_ON_THE_BURSA-WOLF_AND_MOLODENSKY-BADEKAS_TRANSFORMATIONS
- ESRI. (28 de 09 de 2020). *ESRI*. Obtenido de <https://www.esri.com>
- Foster, R., & Mullaney, D. (2009). Article 18. Conversions and Transformations. *Basic Geodesy*, 2. Obtenido de https://earth-info.nga.mil/GandG/coordsys/geoarticles/pdfs/Article018_Conversions_and_Transformations.pdf
- Franklin, C. (1992). An introduction to Geographical Information Systems: Linking maps to databases. *Database*, 13-21.
- Gómez Moreno, R. Á. (2004). *Guía de Proyecciones Cartográficas*. Ciudad de México: INEGI.
- Hexagon Geospatial. (28 de 09 de 2020). *Hexagon Geospatial*. Obtenido de <https://www.hexagongeospatial.com/>
- Jiménez Achury, W. E. (2006). *Introducción a la geometría esférica de Riemann haciendo uso de cabri geometre y una representación analítica*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

- Kothuri, R., Godfrind, A., & Beinat, E. (2007). *Pro Oracle Spatial for Oracle Database 11g* (1 ed.). Berkeley: Apress.
- Malinowski, E., & Zimnyi, E. (2008). *Advanced Data Warehouse Design: From Conventional to Spatial and Temporal Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated.
- OGC. (28 de 05 de 2010). *Open Geospatial Consortium*. Obtenido de ISO 19125:
http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=25355
- Oort, P. (2006, 01 13). Spatial data quality: from description to application. 140. Wageningen, Países Bajos: Universidad de Wageningen.
- Open Source Geospatial Foundation. (28 de 09 de 2020). *OSGeo*. Obtenido de <https://www.osgeo.org/>
- Remoaldo, P., Ribeiro, V., Lopes, H., & Silva, S. (2017). Geographical Information Systems: the past, present and future. En M. Khosrow-Pour, *Encyclopedia of Information Science and Technology* (4 ed.). GI Global.
- SAFE Software. (s.f.). *FME desktop documentation*. Obtenido de
http://docs.safe.com/fme/2019.2/html/FME_Desktop_Documentation/FME_Workbench/Home.htm
- Salgado Don, A. (2015). *Propuesta de criterios y alternativas para la elección de proyecciones cartográficas diferentes a la de Mercator en la elaboración de cartas de navegación electrónica*. Coruña: Universidade da Coruña.
- Simitsis, A. (2003). Modeling and managing ETL processes. *CEUR*.
- Snyder, J. (1987). *Map Projections. A Working Manual*. Whashington, D.C.: United States Government Printing Office.
- Vosselman, G. (2009). Advanced point cloud processing. *ResearchGate*. Obtenido de
https://www.researchgate.net/publication/255655345_Advanced_point_cloud_processing
- Weisberg, D. E. (2008). *The Engineering Design Revolution*. Obtenido de <http://www.cadhistory.net/>