



***ARxCODE***  
***Prototipo de software para el Análisis de Riesgo por***  
***Colisión con Desechos Espaciales.***

**Por *M. Cecilia Valenti.***

Presentado ante la Universidad Nacional de La Matanza y la Unidad de Formación Superior de la  
CONAE como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

**MAGISTER EN DESARROLLOS INFORMATICOS DE APLICACION ESPACIAL**

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA MATANZA

©UFS-CONAE

©UNLAM

DIRECTOR

***Marcelo Colazo***

CONAE, Córdoba, Argentina

CO-DIRECTOR

***Dra. Alicia Mon***

Univarsidad Nacional de la Matanza (UNLaM)

# Abstract

**Keywords:**

# Resumen

# Agradecimientos

# Tabla de Contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Los Desechos Espaciales . . . . .	1
1.2. El Riesgo de Colisión . . . . .	5
1.2.1. El estudio del riesgo de colisión . . . . .	7
1.2.2. Rastreo y catálogos . . . . .	8
1.3. Las Regulaciones Nacionales e Internacionales . . . . .	10
1.4. Antecedentes . . . . .	11
1.5. La Unidad de Desechos Espaciales de la CONAE . . . . .	11
1.6. Planteo del Problema . . . . .	12
1.7. Objetivos . . . . .	13
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>15</b>
2.1. Introducción . . . . .	15
2.2. Comunicaciones de riesgo de colisión . . . . .	16
2.2.1. El CDM . . . . .	16
2.3. La posición de los objetos involucrados . . . . .	19
2.3.1. SGP4 . . . . .	21
2.3.2. Sistemas de Referencia . . . . .	22
2.4. El tratamiento de los Errores en la posición . . . . .	24
2.4.1. Método de Osweiler . . . . .	24

## TABLA DE CONTENIDOS

---

2.4.2. Propagación de errores . . . . .	25
2.5. La Probabilidad de Colisión . . . . .	28
<b>3. Metodología de Desarrollo</b>	<b>35</b>
3.1. Inicialización . . . . .	35
3.2. Iteración . . . . .	36
3.3. Control . . . . .	36
3.4. Entorno de Desarrollo . . . . .	37
<b>4. ARxCODE</b>	<b>39</b>
4.1. Especificaciones generales . . . . .	39
4.2. Requerimientos . . . . .	39
4.3. Interfaces . . . . .	40
4.4. Casos de Uso . . . . .	42
4.5. Arquitectura . . . . .	43
4.6. Diagrama de Actividad . . . . .	48
<b>5. Validación y Resultados</b>	<b>49</b>
5.1. Introducción . . . . .	49
5.2. Implentenación del modelo SGP4 en Python . . . . .	50
5.3. Estudio de errores de TLE con datos históricos . . . . .	50
5.4. Estudio de errores de TLE contra efemérides precisas . . . . .	52
<b>6. Conclusiones</b>	<b>54</b>
<b>7. Apéndice</b>	<b>55</b>
7.1. Appendix 1 . . . . .	55
7.2. Transformación de Coordenadas . . . . .	55
7.3. Appendix 2 . . . . .	56

# Índice de figuras

1.1. Objetos en Órbita . . . . .	3
1.2. Distribución de objetos en función del semieje mayor. . . . .	4
1.3. Proyección de Satélites 2016-2030 . . . . .	4
1.4. Fragmentos de Cohetes 2016-2030 . . . . .	5
1.5. Cantidad de Objetos catalogados al 2014 . . . . .	6
1.6. Evolución de las causas de la generación de Desechos . . . . .	6
1.7. Número de Desechos en las órbitas LEO desde 2015 al 2065 . . . . .	7
1.8. Estudio de Colisión . . . . .	9
1.9. USSTRATCOM - SSN . . . . .	9
1.10. Interfaces del ARxCODE . . . . .	13
2.1. Sistemas de Referencia centrados en el Satélite . . . . .	23
2.2. Método de Osweiler para la generación de la matriz de covarianza . . . . .	25
2.3. Descripción del método propuesto para la propagación de errores . . . . .	26
2.4. Fracción de tabla con el total de datos calculados para la estimación estadística. Se muestran sólo algunos días (primera columna de cada set) de los 6 meses, y los agrupamientos según sean respecto a propagaciones $< 1$ día, $= 1$ día o $= 2$ días . . . . .	27
2.5. B-plane (Adaptado de ....) . . . . .	32
2.6. Esquema del Procedimiento General del cálculo de PoC . . . . .	34
4.1. Diagrama de Interfaces del Sistema . . . . .	41
4.2. Diagrama de Interfaces Implementadas en ARxCODE . . . . .	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.3. Casos de Uso de ARxCODE . . . . .	42
4.4. Componentes de ARxCODE . . . . .	44
4.5. Clases Tle y setTLE . . . . .	45
4.6. Clases CDM y EphemCODS . . . . .	46
4.7. Clase Encuentro . . . . .	47
4.8. Diagrama de Actividades de ARxCODE . . . . .	48
5.1. Clases Tle y setTLE . . . . .	52
5.2. Tendencia anual de las diferencias contra los datos de dinámica orbital en coordenadas cartesianas del Sistema TOD . . . . .	53



# Índice de tablas

1.1. Daño según el tamaño del desecho. . . . .	8
1.2. Sistemas de Alerta . . . . .	11
2.1. Tabla con los valores medios para la propagación de errores. . . . .	27
4.1. Tabla de Requerimientos . . . . .	40
4.2. Caso de Uso: Procesar Encuentro . . . . .	43
5.1. Resultados que genera ARxCODE utilizando la librería sgp4 de python para la propagación. . . . .	50
5.2. Resultados del Systems Tool Kit (STK) propagando el mismo TLE que ARxCODE. .	50
5.3. Satélites de Estudio . . . . .	51
5.4. Matriz de Covarianza de la Bibliografía (Osweiler, 2006) - Satélite ICESAT en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03 . . . . .	51
5.5. Matriz de Covarianza que produce ARxCODE - Satélite ICESAT en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03 . . . . .	51
5.6. Diferencias de los valores calculados por ARxCODE respecto a los valores publicados en el trabajo de Osweiler (?) . . . . .	51
5.7. Matriz de Covarianza de la Bibliografía (Osweiler, 2006) - Satélite LAGEOS-1 en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03 . . . . .	51
5.8. Matriz de Covarianza que produce ARxCODE - Satélite LAGEOS-1 en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03 . . . . .	51

## ÍNDICE DE TABLAS

---

5.9. Diferencias de los valores calculados por ARxCODE respecto a los valores publicados en el trabajo de Osweiler (?) . . . . .	52
--	----

# Lista de acrónimos

<b>CDM</b>	Conjunction Data Message
<b>TLE</b>	Two-Line elements
<b>NORAD</b>	North American Aerospace Defense Command
<b>PoC</b>	Probabilidad de Colisión
<b>ESA</b>	European Space Agency
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>CCSDS</b>	Consultative Committee for Space Data Systems
<b>LEO</b>	Low Earth Orbit
<b>ONU</b>	Organización de las Naciones Unidas
<b>TOD</b>	True of Date
<b>TEME</b>	True Equator Mean Equinox
<b>ECI</b>	Earth Centered Inercial
<b>RTN</b>	Radial, Transverse, Normal
<b>IDE</b>	Integrated Development Environment
<b>CODS</b>	CONAE Orbyt Dynamics Services

# Introducción

## 1.1. Los Desechos Espaciales

El comienzo de la era satelital en el año 1957 con el satélite ruso Sputnik significó la conquista de un nuevo espacio y un cambio de paradigma en lo que respecta a las tecnologías para las comunicaciones, los estudios de nuestro planeta, el sistema solar, las formas de navegar, de geoposicionarse y el intercambio de información. Desde entonces el ambiente espacial cada vez suma más colonos.

Las experiencias de las primeras misiones aportaron mucho conocimiento de este entorno con características muy distintas a las de la superficie de la Tierra y permitieron ir mejorando las técnicas y los materiales para que los satélites cumplieran sus objetivos sin mayores inconvenientes. Sin embargo, un hecho poco predicho o abordado empezó a ocupar prioridad en las dos últimas décadas: los *desechos espaciales*.

**Definición:** *Son Desechos Espaciales todos los objetos contruidos por el hombre, incluyendo fragmentos o partes de los mismos, que orbitan la Tierra o reingresan a la atmósfera y no son funcionales, es decir, han perdido su capacidad operativa. (IADC, 2007)*

La ocupación del espacio parecía ilimitada, y los primeros años no se tenían consideraciones respecto a los objetos que allí se depositaban, o se desprendían de los cohetes y las misiones. Pero con el correr del tiempo, ciertas regiones cobraron interés estratégico, y la superpoblación en dichas zonas no tardó en mostrar complicaciones.

La primera colisión confirmada y claramente registrada entre una misión operativa y un desecho, ocurrió el 24 de Julio de 1996, cuando el satélite francés Cerise (95-033B) fue embestido por un fragmento (86-019RF), remanente de la explosión de la última etapa del Ariane-1 H-10, ocurrida el 13 de noviembre de 1986; nueve meses después de inyectar en órbita al satélite SPOT-1. La reconstrucción de la situación luego de la colisión, coincide plenamente con una pérdida de la actitud del Cerise que fue registrada en los datos históricos abordo. (Klinkrad, 2006a)

Existen distintos abordajes respecto a la problemática de los desechos espaciales. La National Aeronautics and Space Administration (NASA) propone una clasificación general según sean estudios de: modelado, rastreo, protección, mitigación, remediación o reingreso.

- **Modelado:** Consiste en el desarrollo y la actualización de los modelos orbitales de los desechos, para describir y caracterizar el ambiente actual y la proyección futura.
- **Rastreo:** Mediciones que se hacen con radares y telescopios ópticos desde tierra, y también con telescopios espaciales.
- **Protección:** Estudios hechos en impactos de alta velocidad para el desarrollo de nuevos materiales y diseños que ofrezcan una mayor protección.
- **Mitigación:** Planificación de estrategias para reducir la generación de nuevos desechos. Generación de documentación de buenas prácticas, estándares y promoción de acuerdos internacionales.
- **Remediación:** Diseño de misiones que se encarguen de reducir el número de objetos inactivos en órbita.
- **Reingreso:** Identificación de los reingresos no controlados, para hacer análisis sobre las zonas de posibles impactos en Tierra y la planificación de reingresos controlados.

Organismos como el Centro Principal de Inteligencia Espacial Ruso, el Departamento de Defensa Norteamericano, la NASA y la European Space Agency (ESA), han desarrollado tanto modelos de evolución como de ingeniería, y mantienen catálogos actualizados con las trayectorias de aquellos objetos cuyo tamaño permite detectarlos con instrumentos de rastreo en Tierra.

Los modelos de evolución muestran la configuración actual y proyecciones de configuraciones futuras del ambiente espacial incluyendo todos los objetos que orbitan la Tierra.

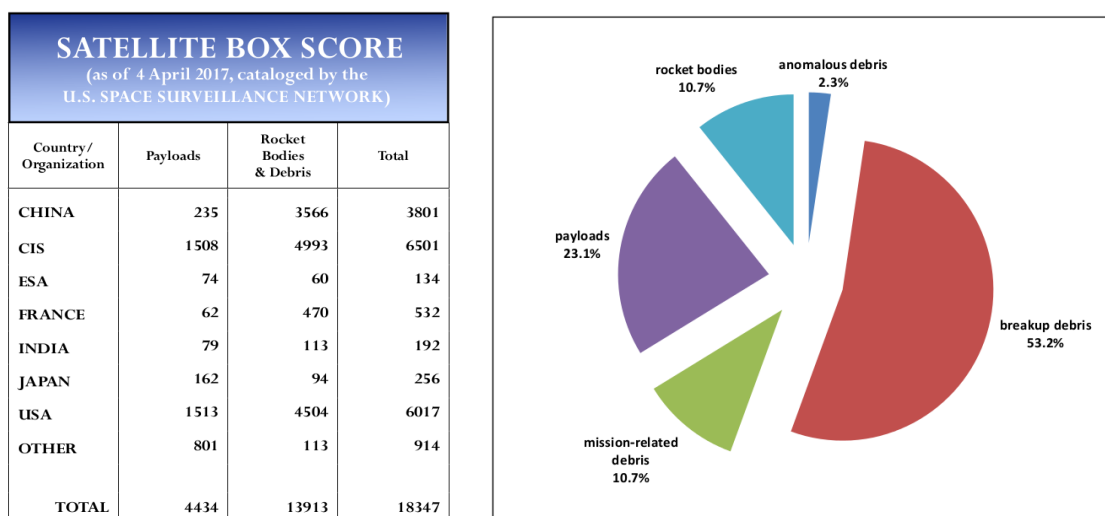
Los modelos de ingeniería se enfocan en distintas pruebas de laboratorio o de misiones específicas en órbita, que testean la respuesta de los materiales cuando se exponen a impactos con fragmentos de distinto tipo, particularmente en aquellos de tamaños muy chicos pero que colisionan a velocidades del orden de diez kilómetros por segundo.

En este trabajo nos enfocamos en el análisis de las situaciones de riesgo de colisión, dentro del marco de la *mitigación*, y particularmente para las misiones y los desechos que se ubican en las órbitas bajas Low Earth Orbit (LEO).

## El entorno de los Desechos Espaciales

Según los informes de la Agencia Espacial Europea (ESA, 2013), desde 1957 hasta la actualidad, 5250 lanzamientos han poblado el ambiente espacial con casi 23000 objetos de los cuales, sólo cerca de 1200 son satélites operativos.

De acuerdo a una publicación de la NASA (2017a), hasta el 04 de Abril de 2017, se contabilizan 18347 objetos catalogados que orbitan la Tierra, Fig. 1.1(c). Clasificados según sean: cargas útiles, cohetes, desechos de misión, desechos anómalos o desechos de fragmentación.



(c) Objetos en Órbita al 4 de Abril de 2017. (d) Porcentaje de Objetos en Órbita según su clasificación.

**Figura 1.1:** Objetos que Orbitan la Tierra. Extraído de NASA (2017b)

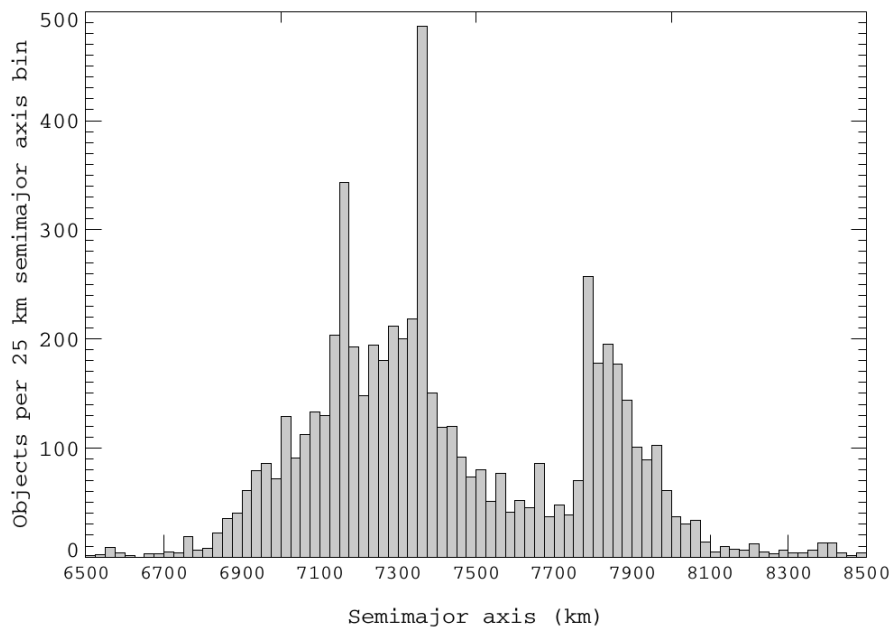
Otra clasificación podría ser por la altura, ya que la distribución no es homogénea. La relación entre la densidad de objetos y la altura a la que se encuentran, señala que existen regiones más comprometidas. Las órbitas bajas o LEO con un rango de alturas entre los 500 y los 2000 kilómetros, son las más superpobladas y contienen casi el 70 % de todos los objetos catalogados. Ver figura 1.2

Si se mira hacia el futuro, las predicciones no parecen muy alentadoras. Si bien, los acuerdos internacionales en relación a acciones para reducir la proliferación de desechos avanzan y muestran buenos resultados, los proyectos de nuevas misiones tienden a aumentar el número de objetos, sobre todo en las órbitas bajas. Donde las colisiones pasarían a ser las principales generadoras de desechos.

En un reporte técnico publicado por la NASA (Karacalioglu and Stupl, 2016), se evalúan las nuevas tendencias de la industria satelital y se analiza el futuro panorama del entorno espacial en las órbitas bajas, en función de los lanzamientos planificados y las misiones anunciadas, Fig. 1.3.

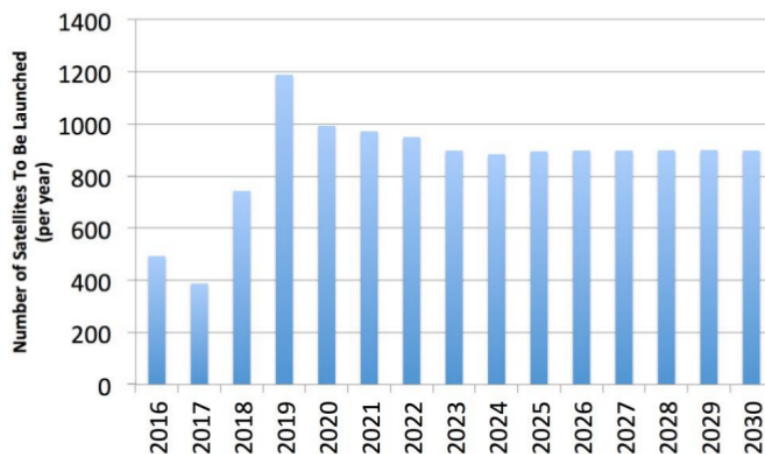
En los últimos años se ha incrementado el número de agencias o empresas que se dedican al desarrollo espacial. El nuevo paradigma de constelaciones de pequeños satélites, sistemas distribuidos o arquitecturas fragmentadas en reemplazo de los grandes y costosos satélites tradicionales, ha permi-

## 1.1 LOS DESECHOS ESPACIALES



**Figura 1.2:** Distribución de objetos en función del semieje mayor. Adaptado de (Klinkrad, 2006b)

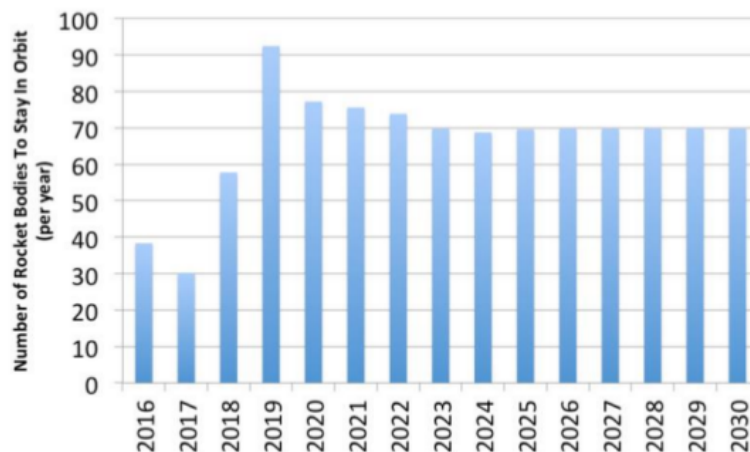
tido la democratización del espacio, facilitándole el acceso a más agencias y empresas. Un claro ejemplo son las constelaciones para comunicaciones anunciadas por OneWeb y SpaceX, que proyectan lanzar del orden de 600 satélites cada una para fines del 2019.



**Figura 1.3:** Proyección de Satélites 2016-2030. Extraído de (Karacalioglu and Stupl, 2016)

Estos satélites aumentan la población de objetos en órbita durante su vida útil pero, por sobre todo, dependiendo de sus características, pueden permanecer en órbita inactivos por más de 20 años si no se toman medidas de reingreso una vez finalizada su misión.

A su vez, aunque ya existen modelos experimentales y en desarrollo en lo que respecta a recuperar partes de los lanzadores, cada lanzamiento inyecta en órbita no sólo los satélites sino también las últimas etapas de los cohetes *rocket bodies* Fig. 1.4.



**Figura 1.4:** Fragmentos de Cohetes que permanecerán en órbita en el periodo 2016-2030. Extraído de Karacalioglu and Stupl (2016)

## 1.2. El Riesgo de Colisión

La primera colisión catastrófica que se registra, sucedió en el año 2009, entre el satélite ruso KOS-MOS 2251 que había quedado fuera de servicio y el satélite operativo IRIDIUM 33 de la constelación de IRIDIUM.

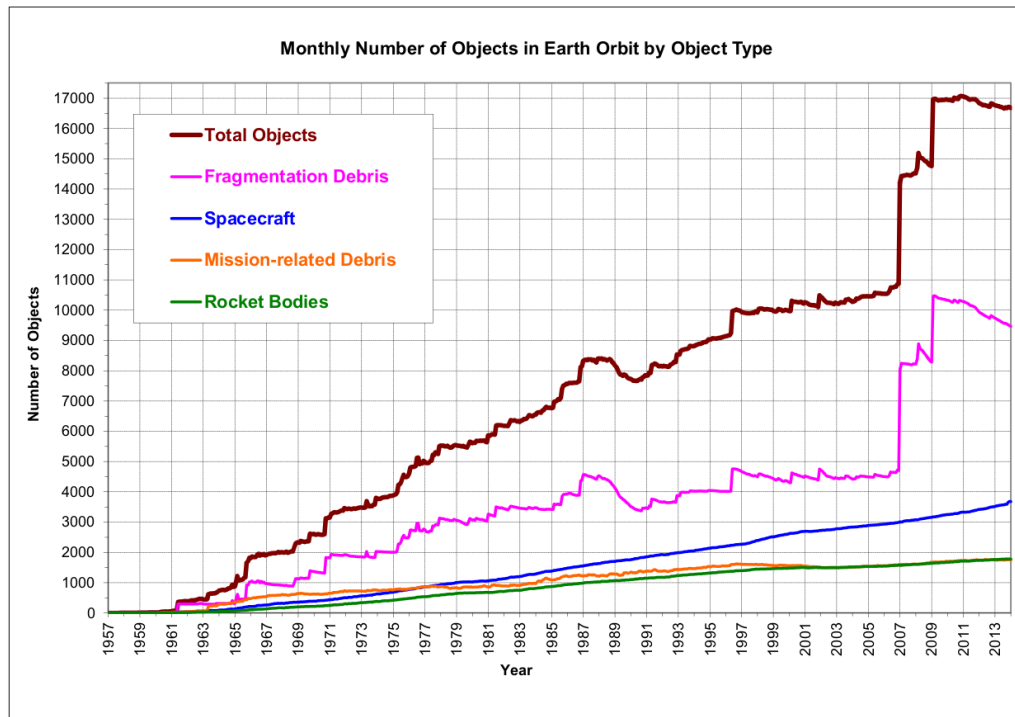
El evento ocurrió a 790 kilómetros de altura y generó más de 2500 fragmentos, de los cuales, 500 aún permanecen en órbita. Este panorama, marcó la materialización de una situación que se preveía que podía ocurrir y ofició de catalizador de los estudios vinculados a la predicción, análisis y mitigación del riesgo de colisión.

De los distintos modelos de evolución y de las descripciones del ambiente espacial a través de los años, se distingue claramente como aumenta el número de desechos cuando ocurren colisiones significativas. Así puede apreciarse en la Fig. 1.5, donde la línea magenta que señala los desechos producidos por fragmentaciones, sube abruptamente a comienzos del año 2007 debido a la destrucción intencional del satélite chino Fengyun, en una prueba misilística, y en 2009 con la colisión entre el IRIDIUM 33 y el KOSMOS que mencionábamos más arriba.

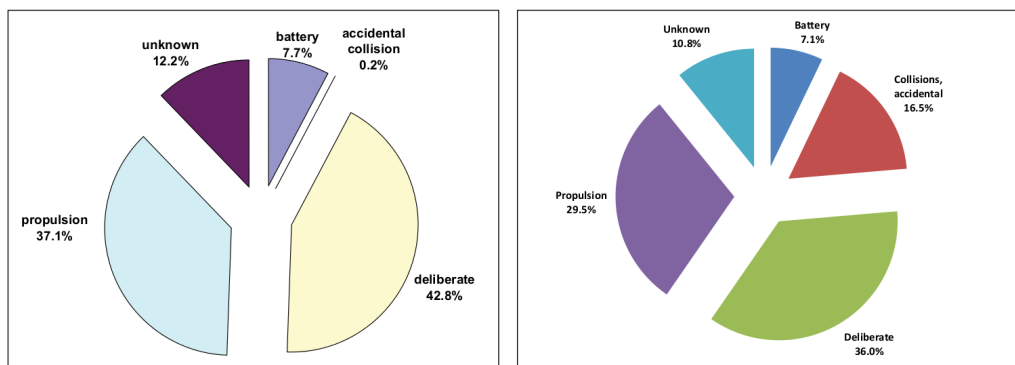
A su vez, se prevee que a partir del incremento de objetos, en particular en las órbitas bajas, aumenten las colisiones, convirtiéndose las mismas, en las principales fuentes de generación de desechos.

La Fig. 1.6 muestra el porcentaje del remanente de desechos producto de rupturas debido a diferentes causas, fue modificándose en los últimos años. Las distintas políticas de mitigación en relación a explosiones intencionales, el remanente de combustibles, un enfoque más profundo en el tratamiento de las baterías y la protección de los materiales frente a impactos, han reducido el número de desechos producto de explosiones intencionales, explosiones generadas por los combustibles, las fallas de las baterías y las causas desconocidas. Mientras que los desechos generados por colisiones han aumentado.





**Figura 1.5:** Cantidad de Objetos catalogados al 2014 - Se distingue el incremento abrupto producto de las fragmentaciones del Fengyun Chino en 2007 y de la colisión entre el IRIDIUM y el Kosmos en 2009. Extraído de (NASA, 2014)

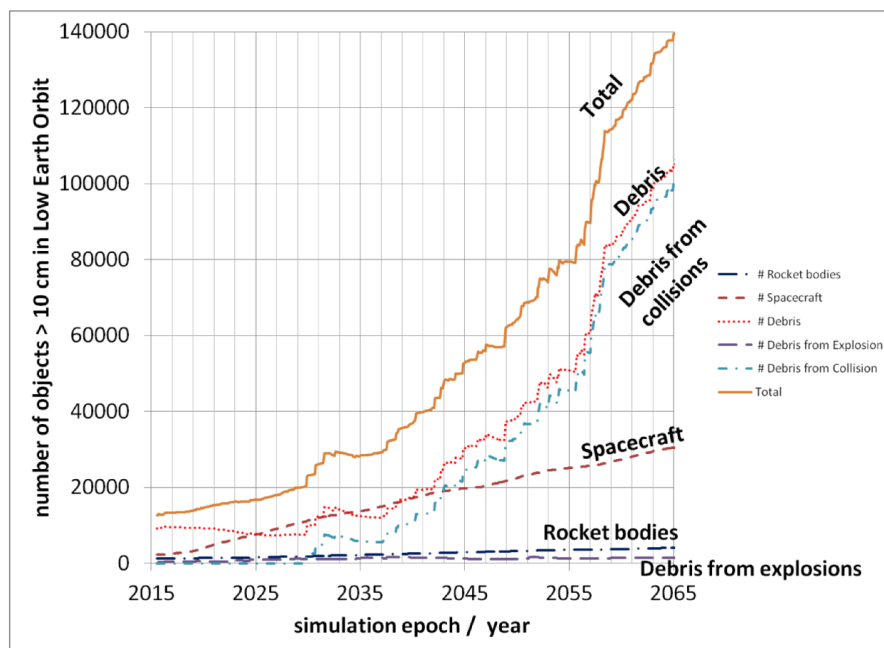


**Figura 1.6:** Evolución de las causas de la generación de Desechos entre 2007 y 2016. Extraído de (NASA, 2017a)

Conclusiones similares se desprenden del estudio de (Karacalioglu and Stupl, 2016), cuyas simulaciones futuras señalan que en los próximos años serán las colisiones las que mayor número de desechos aporten al total de objetos que orbitan la Tierra en las órbitas bajas Fig. 1.7

Ya en 1978 estudios predictivos hechos por D. Kessler y Cour-Palais Kessler and Cour-Palais (1978), anunciaban el riesgo del efecto en cascada que podrían producir las colisiones, aumentando los desechos en un camino catastrófico sin fin y mostrando que los desechos generados por colisiones superarían los impactos por meteoritos.

Por su parte los modelos de ingeniería ofrecen una descripción de los distintos efectos que produ-



**Figura 1.7:** Número de Desechos en las órbitas LEO desde 2015 al 2065. Extraído de (Karacalioglu and Stupl, 2016)

cen los impactos, dependiendo del tamaño del desecho. Ver tabla 1.1

### 1.2.1. El estudio del riesgo de colisión

Un análisis completo del Riesgo de Colisión abarca, (Fig. 1.8):

- Identificar las situaciones de encuentro.
- Analizar la situación del encuentro.
- Ejecutar maniobras de mitigación del riesgo si fuera necesario.
- Iterar el proceso con minuciosidad para no ofrecer soluciones momentáneas que generen nuevos riesgos de colisión.

#### Identificación de las situaciones de encuentro:

A partir de los datos generados por las redes de rastreo (Ver 1.2.2), se propagan las trayectorias orbitales y, bajo ciertos criterios definidos previamente, se detectan los acercamientos no deseados. En esta idea subyace la definición de *Encuentro*.

Son pocos los organismos y agencias capaces de realizar este procedimiento, incorporando a sus predicciones todos los objetos catalogados y/o rastreados.

En un formato más simplificado, el interés se enfoca en una misión en particular y se desarrollan filtros, para procesar encuentros analizando una menor cantidad de objetos.

#### Análisis de la situación del encuentro:

El mismo consiste en estudiar el encuentro con mayor profundidad y detalle, sumando información

Tamaño mínimo de la partícula que genera el efecto	Efecto
100 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Daño significativo en sensores sensibles. (Las ventanas del transbordador requieren recambio)</li> <li>* Corta ataduras, anclajes y cables.</li> <li>* Penetración de las multicapas de aislación (MLI)</li> <li>* Penetración de las paredes con grosores de 300 a 500 <math>\mu\text{m}</math>.</li> <li>* Penetración de los tubos de calefacción, <b>coolant loops</b> y radiadores.</li> <li>* Penetración de celdas solares.</li> </ul>
1 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Cráteres y perforaciones de 2 mm a 1 cm de diámetro dependiendo del tipo del material y el grosor.</li> <li>* Penetración de las paredes con grosores de 3-5 mm.</li> <li>Daño del equipamiento detrás de las paredes.</li> <li>* Penetración de tanques, <b>baffles</b>, <b>sun-shields</b> y cables externos.</li> </ul>
1 cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Daño estructural y destrucción de alguna parte impactada.</li> <li>* Penetración de todas las capas con protección especial.</li> </ul>
10 cm	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Destrucción total del satélite o del subsistema impactado.</li> <li>* Interferencia con observaciones astronómicas.</li> </ul>
1m	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Partes sólidas de la plataforma pueden sobrevivir y reingresar a la atmósfera, incluso alcanzando la superficie.</li> </ul>

**Tabla 1.1:** Daño según el tamaño del desecho. Extraído de IADC 08/03, Versión 2.1, Abril 2013

más confiable en la determinación orbital, y calculando parámetros estadísticos, como la Probabilidad de Colisión (PoC).

A medida que se aproxima la fecha en la que se predice el encuentro, se tiene mejor conocimiento de la órbita de los objetos involucrados, pero menor tiempo de reacción en la toma de decisiones. Es decir, en el análisis del encuentro se busca un balance entre los tiempos que conlleve el estudio para alcanzar la confiabilidad necesaria, y el margen que se requiere para, por ejemplo, planificar una maniobra.

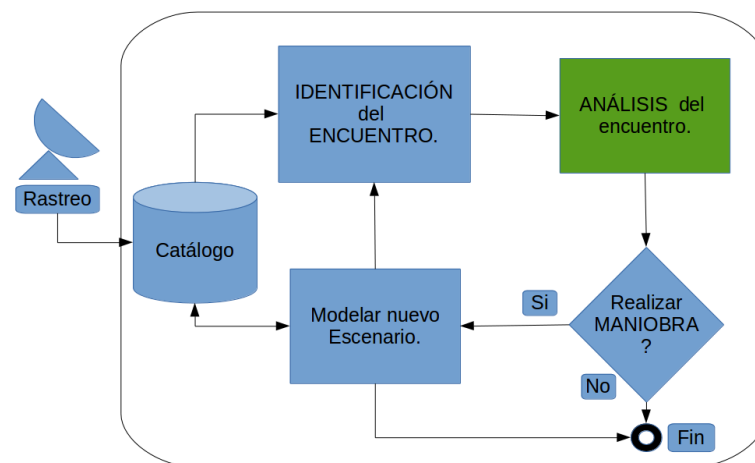
En este ítem en particular se enfoca este trabajo.

### Realización de una maniobra:

Si la situación lo ameritara, la única manera de evitar una colisión es la **realización de una maniobra**, conocidas como Maniobras de Mitigación de Riesgo (RMM). No obstante, modificar la trayectoria de un objeto, siempre presupone una evaluación a priori de que no vaya a producirse una colisión. De manera, que en este punto, se realizan propagaciones con las posiciones estimadas durante y luego de la maniobra, y se itera el proceso para estas nuevas posiciones contra el catálogo de objetos.

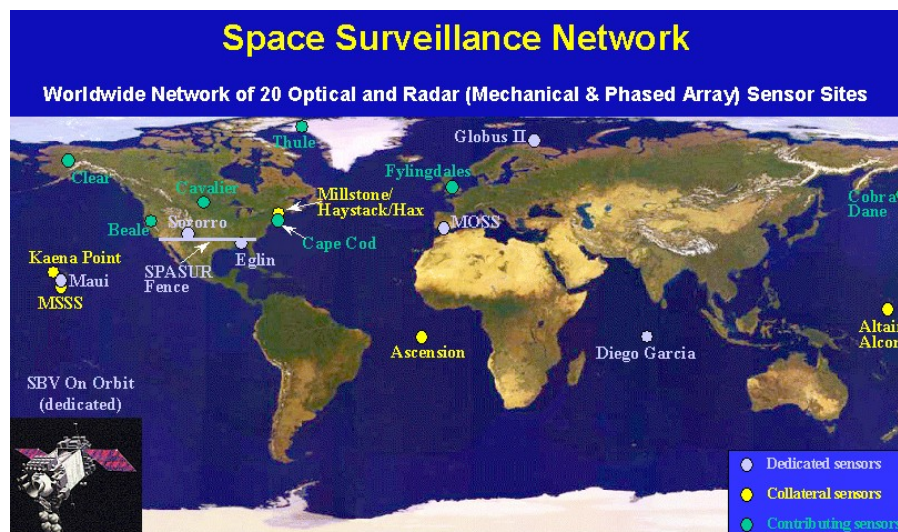
### 1.2.2. Rastreo y catálogos

En los catálogos actuales se registran objetos mayores a los 10 cm en las regiones LEO monitoreadas con radares, y mayores a 1 m en las órbitas GEO observadas con telescopios ópticos.



**Figura 1.8:** Esquema de alto nivel de los procesos en un estudio completo de riesgos de colisión. (Se indica en color verde, la etapa que se desarrolla en este trabajo.)

La entidad militar US Strategic Command (USSTRATCOM) de EE.UU mantiene un catálogo con 18347 objetos conocidos (al 4 de Abril de 2017). Para su construcción y mantenimiento, utiliza la Space Surveillance Network (SSN), Fig.1.9 que posee más de 20 sensores civiles y militares a lo largo de todo el mundo.



**Figura 1.9:** US. Strategic Command Space Surveillance Network. Extraído de [https://en.wikipedia.org/wiki/United\\_States\\_Space\\_Surveillance\\_Network](https://en.wikipedia.org/wiki/United_States_Space_Surveillance_Network)

Rusia es la única nación, aparte de EE.UU, que cuenta con un sistema de rastreo que le proporciona una base de datos de objetos espaciales artificiales significativa y actualizada. A su vez, independiente del gobierno Ruso, el KIAM1 promueve la red internacional: International Scientific Optical Network (ISON), que ofrece uno de los programas coordinados de monitoreo de desechos más importante. La red cuenta con 30 telescopios en el rango de 0.5 a 2.6 m de diámetro, repartidos en 20 observatorios de 8 países en todo el mundo.

Por su parte, la ESA inició programas de monitoreo hace ya varios años. En la actualidad predominan las investigaciones realizadas por las agencias espaciales: ASI (Italia), BSNC (UK), CNES (Francia), y DLR (Alemania), con el apoyo de la industria, institutos de investigación y universidades. En los últimos 10 años han estado trabajando en forma coordinada para implementar un Sistema Europeo de Vigilancia Espacial. A tal fin cuentan con varios telescopios ópticos como el Zeiss de 1 m de Tenerife, el Schmidt y Tarot en Francia, o los sensores PIMS (Passive Imaging Sensors) del Reino Unido, y con importantes radares, como el TIRA (Tracking and Imaging Radar) en Alemania, o los más modernos EISCAT Y EICAT 3D (European Incoherent Scatter Radar) que logran detecciones de objetos del orden de los centímetros a distancias de 800 km.

### 1.3. Las Regulaciones Nacionales e Internacionales

Dado el carácter global de esta problemática, distintas naciones y agencias internacionales con gran desarrollo y actividad espacial, se han estado organizado en la búsqueda de acuerdos y buenas prácticas. Entre los organismos que coordinan las recomendaciones, se encuentran:

- COPUOS: Committee of the Peacefull Uses of Outer Space Organización de las Naciones Unidas (ONU)
- IADC: Inter-Agency Space Debris Coordination Committee
- CCSDS: Consultative Committee for Space Data Systems

La NASA fue la primera en adoptar un set de lineamientos para la mitigación de los desechos espaciales en 1995, que fueron posteriormente incorporados por el gobierno de EE.UU en 1997. En el año 2002 el IADC conformado por diez países y la ESA, elaboró un nuevo conjunto de lineamientos. Finalmente en 2007 el subcomité científico y tecnológico del COPUOS aunó los esfuerzos y reunió todos los trabajos previos, logrando un consenso en los lineamientos definitivos promulgados por la ONU en 2008 (NASA).

En lo que respecta a los límites de este trabajo, podemos citar las siguientes Normas, Recomendaciones y Legislación:

- Convenio sobre Responsabilidad Internacional por daños causados por objetos espaciales. ONU - (29-03-72)
- Ley 23.335 (19-08-86) - Arg. Suscribe al Convenio de ONU.
- Space Debris Mitigation Guidelines - IADC.
- ISO 24113:2011 *Space Debris mitigation requirements*.

- ISO/TR 16158:2013 *Space Systems - Avoiding collision with orbiting objects*.
- ISO 19389:2014 *Space data and information transfer Systems*. Conjunction Data Message: specifies a standard message format for use in exchanging spacecraft conjunction information between originators of Conjunction Assessments (CAs) and satellite owner/operators and other authorized parties.
- *Guidelines for the long-term sustainability of outer space activities*. Vienna, 8-17 de Junio de 2016.

## 1.4. Antecedentes

En este contexto, ya existen claros antecedentes que abordan la problemática con sus respectivos soportes informáticos. (ver tabla 1.2)

Herramienta	Descripción	Proveedor/Agencia
<b>CARA</b>	<i>Conjunction Assessment Risk Analysis</i>	NASA Robotic Conjunction Assessment Risk Analysis group, en convenio con la empresa a.i. solutions, Inc.
<b>SOCRATES</b>	<i>Satellite Orbital Conjunction Reports Assessing Threatening Encounters in Space</i> , servicio web vía Celestrack.com	CSSI (Center for Space Standards & Innovation) de la agencia AGI: Analytical Graphics, Inc.
<b>CRASS</b>	<i>Collision Risk Assessment tool</i>	Desarrollado por la empresa GMV, que presta servicios al Centro Europeo de Operaciones Espaciales (ESOC) - Darmstadt, Alemania. J.R. Alarcón Rodríguez (2004)
<b>CAESAR</b>	<i>Conjunction Analysis and Evaluation Service, Alerts and Recommendations</i>	Agencia francesa CNES, que utiliza como soporte el Software JAC Java for Assessment of Conjunctions. Laporte (2014)
<b>CRAMS</b>	<i>Collision Risk Assessment and Mitigation System</i>	Canadian Space Agency (CSA). Babiker et al. (2012)

**Tabla 1.2:** Sistemas de Alertas de distintas Naciones y Agencias

## 1.5. La Unidad de Desechos Espaciales de la CONAE

De acuerdo con el Plan Nacional Espacial: **Argentina en el Espacio 2004-2015** [5], las misiones de la CONAE, fundamentalmente pensadas para observación de la Tierra, ocupan órbitas bajas de diseño estratégico. Es decir, se ubican en regiones de mucha demanda y en consecuencia se encuentran

expuestas a un alto riesgo de colisión.

En nuestro país, compete a la Unidad de Desechos Espaciales de la Secretaría General de la CONAE; quien tiene la facultad de mantener las relaciones con los organismos internacionales, garantizar que se cumplan los distintos convenios y acuerdos a los que Argentina ha adherido, como por ejemplo el *Convenio sobre la Responsabilidad Internacional por daños causados por objetos espaciales*, suscripto por la República Argentina el 29 de marzo de 1972. (LEY N 23.335, sancionada: Julio 30 de 1986 - promulgada: Agosto 19 de 1986.1).

Así mismo, como miembro parte de la ONU, responde ante el COPUOS en materia de buenas prácticas para la mitigación de la generación de desechos espaciales.

Como ya mencionamos en la [Sec. 1.2.2], las únicas naciones que cuentan con una red de rastreo con capacidad de detectar, rastrear y catalogar objetos son EE.UU y Rusia. De manera que Argentina planifica y ejecuta sus maniobras de riesgo (RMM) a partir de información que le proveen servicios externos.

## 1.6. Planteo del Problema

El desfavorable panorama futuro en materia de colisiones en órbita, conlleva a los centros de operaciones a incorporar procedimientos y soportes, para la gestión, el análisis y la prevención de las colisiones.

Dependiendo de las distintas capacidades con que cuentan las agencias, estos sistemas incluyen desde: redes o instrumentos específicos de rastreo propios, catálogos completos de los objetos capaces de ser rastreados, sistemas de detección anticipada de acercamientos de riesgo, sistemas de análisis de situaciones de riesgo alertadas por agentes externos o contratación de servicios externos que resuelven la totalidad del análisis incluyendo la sugerencia de las maniobras pertinentes.

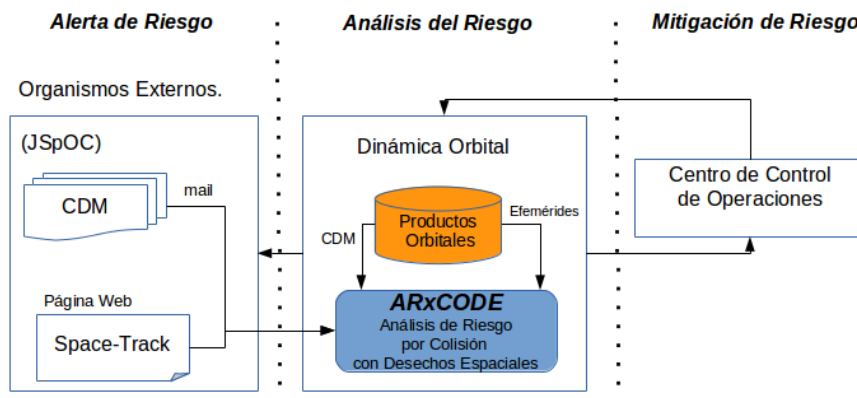
Es una de las situaciones que se aborda con mucha delicadeza dentro del área espacial y dado el nivel de riesgo que implica, la CONAE contrata un servicio de asesoramiento y control para la planificación de las operaciones vinculadas al alerta por colisión.

Ofrecer un servicio que reemplace al que se utiliza actualmente en CONAE, es impensado y escapa por mucho a los alcances de este trabajo. No obstante, hemos desarrollado una herramienta que permite una clara caracterización de la situación y un mayor conocimiento para enriquecer el diálogo e intercambio de información con los organismos y agencias que proveen el servicio y asesoramiento. Así mismo, se piensa como un planteo preliminar, con versatilidad para ser testeado, perfeccionado y ampliado a largo plazo.

La herramienta ARxCODE para el Análisis de Riesgo por Colisión con Desechos, que presentamos en esta tesis, consiste en un prototipo de software para ser montado sobre la estructura actual con la que cuenta el departamento de Dinámica Orbital, y que pueda ser evaluado por operadores del sector con amplios conocimientos del área.

## 1.7 OBJETIVOS

El mismo oficiará de soporte al operador de dinámica orbital, quien se encargará de procesar la información con las facilidades que ARxCODE provee y generar los reportes necesarios que faciliten el intercambio de información y la toma de decisiones Fig. 1.10



**Figura 1.10:** Esquema de Interfaces entre ARxCODE el organismo externo que envía el mensaje de alerta JSpOC, el Departamento de Dinámica Orbital y el Centro de Control.

## 1.7. Objetivos

### Objetivo principal

Diseñar un procedimiento operativo frente a situaciones de alerta por riesgo de posible colisión con desechos espaciales y desarrollar un prototipo de software: ARxCODE, que mejore el cálculo de los parámetros de caracterización del riesgo y facilite al analista la toma de decisiones y/o el diálogo con los servicios de alerta externos.

### Objetivos específicos

- Automatizar la recepción y gestión de los mensajes de alertas (CDM) por posibles colisiones, que se reciben de organismos internacionales de rastreo.
- Desarrollar una técnica que mejore la estimación de los errores en la posición del desecho espacial.
- Calcular la Probabilidad de Colisión (PoC) para caracterizar la situación de encuentro.



## 1.7 OBJETIVOS

---

- Desarrollar un prototipo de software (ARxCODE) para el procesamiento de la información, el manejo de las notificaciones, la visualización del evento y la generación de reportes.

## Marco Teórico

### 2.1. Introducción

Para el análisis de posibles colisiones es necesario evaluar de forma anticipada las trayectorias de todos los objetos que orbitan la Tierra y detectar los acercamientos de riesgo. Si la predicción de las posiciones fuera exacta, este estudio sólo implicaría un esfuerzo computacional a resolver. No obstante, el movimiento orbital de los objetos no es ideal y las posiciones medidas o estimadas siempre acarrearán una indeterminación, y más aún cuando se trata de desechos.

La técnica de detección de encuentros, consiste en realizar propagaciones de las posiciones de todo el catálogo una semana hacia el futuro, definir un volumen seguro rodeando al satélite de interés, y si algún objeto externo se introduce dentro del volumen de riesgo, es decir, se acerca a una distancia mínima por debajo del umbral determinado, se considera una situación de riesgo. Esta metodología no tiene en cuenta los errores en la determinación de la posición de los objetos, y por lo general deriva en falsas alarmas, con las que se corre el riesgo de realizar maniobras innecesarias.

Una vez identificado un encuentro, para un estudio más exhaustivo de la situación, además de la mínima distancia de acercamiento o *miss distance*, se calcula la *probabilidad de colisión*: PoC. Esta última ofrece un panorama más completo ya que incorpora los errores en las posiciones a través de las matrices de covarianza.

Como ya mencionamos (Sec. 1.2.1), en este trabajo nos enfocamos en analizar las situaciones de encuentro ya identificadas y en particular, aquellas que involucran a misiones operativas y desechos espaciales.

La posición de la misión operativa y los errores asociados a la misma, la provee el departamento de dinámica orbital (Sec. 2.3). La posición de los desechos, sólo es posible conocerla, utilizamos los datos públicos que ofrece el comando de defensa norteamericano, North American Aerospace Defense Command (NORAD) a través de su página Space-Track <sup>1</sup>. Las posiciones son publicadas en formato

<sup>1</sup><http://www.space-track.org>

Two-Line elements (TLE) (Sec. 2.3), sin errores asociados, y son propagadas hasta el momento del encuentro con el modelo SGP4 (Hoots and Roehrich, 1980a), que tampoco ofrece información sobre los errores de propagación.

En este capítulo, en primer lugar presentamos la forma en que se comunican los acercamientos de riesgo (Sec. 2.2), por ejemplo mediante Conjunction Data Message (CDM). Luego describimos las distintas determinaciones en las posiciones y los formatos en que se presentan. En el caso del formato TLE, dedicamos un ítem para presentar el modelo de propagación SGP4 (Sec. 2.3.1)

Para el estudio de la estimación de errores, detallamos el método de Osweiler (Osweiler, 2006) que permite la construcción de las matrices de covarianza a partir de un conjunto de TLEs, cuando no se cuenta con datos más precisos.

Una vez calculada la matriz de covarianza para ambos objetos involucrados en el encuentro, será necesario propagarla al instante predicho para el encuentro. Para ello proponemos la implementación de una tabla con valores estadísticos inferidos del análisis de datos de la misión.

Finalmente detallamos el algoritmo para el cálculo de la PoC.

## 2.2. Comunicaciones de riesgo de colisión

Desde el momento en que la superpoblación del espacio empezó a analizarse desde un punto de vista de riesgo, las agencias u organismos capaces de rastrear el ambiente espacial, fueron las primeras en implementar sistemas de comunicación para advertir sobre posibles colisiones. Las comunicaciones, que en sus orígenes eran mails particulares, fueron migrando a un mensaje formal y estandarizado y finalmente en Junio del 2013, el Consejo Consultivo para los Sistemas de Datos Espaciales, Consultative Committee for Space Data Systems (CCSDS), publicó el mensaje estándar recomendado que se utiliza en la actualidad, el: CDM (Consultative Committee for Space Data Systems, 2013).

El *CCSDS 508.0-B-1, Conjunction Data Message Recommended Standard* describe en detalle la estructura del formato recomendado, aunque no propone formas de intercambio, dejando a las partes la potestad de acordar sus formas de realizar la comunicación de los mismos, que, deberán ser detalladas en el documento de interfaces (ICD).

(se puede ampliar en contexto historico, mencionando a NASA y al CSM)

### 2.2.1. El CDM

Es un mensaje estandarizado para el intercambio de información entre los organismos capaces de detectar acercamientos y los dueños y operadores de los objetos involucrados en el encuentro.

Los CDM se envían 72 horas antes del encuentro a los operadores a cargo y/o se disponibilizan en la página de space-track para usuarios con permisos especiales.

Los mismos se generan y se distribuyen de acuerdo a ciertos criterios.

#### Criterios de generación y envío de CDMs

- Para las **órbitas bajas**, se consideran las situaciones en las que la mínima distancia total es menor a 1 kilómetro y la distancia relativa en la componente radial es menor a los 200 metros.
- Para las regiones de los **satélites geoestacionarios o las regiones medias**, se envían mensajes si la mínima distancia total es menor a los 10 kilómetros.

Su formato estandarizado unifica la información que allí se publica y facilita la interoperabilidad sin ambigüedades. Su estructura está pensada para que sea de fácil interpretación tanto para personas como para máquinas. Esto permite a los centros de control de las operaciones, la automatización de los procesos de recepción de los mensajes y ofrece la información con tiempo suficiente para la toma de decisiones.

Es un mensaje codificado en formato ASCII, que puede distribuirse mediante un texto plano (KVN), o por medio de un XML.

Son exclusivamente informativos, no imprimen recomendaciones ni sugerencias de acción. Y es importante destacar, que los centros de cómputo que los generan, no siempre cuentan con la información de las próximas maniobras planificadas para los satélites.

El CDM contiene la mínima distancia, la probabilidad de colisión, el tiempo del máximo acercamiento (TCA) y las posiciones y velocidades relativas en el momento de mínima distancia; entre otros datos, ver ([Apéndice](#))

Ofrece la siguiente información de un único encuentro entre dos objetos: *Object1* y *Object2*:

- Las posiciones de *Object1* y *Object2* en el instante de máximo acercamiento TCA. Los mismos en alguno de los sistemas de referencia más utilizados: [ver apéndice F](#)
- Las covarianzas de las posiciones de los objetos en el instante TCA, tomando como referencia el centro de uno de ellos.
- La posición y velocidad relativa del *Object2* respecto al centro del *Object1*.
- Información relevante respecto a cómo fueron obtenidos los datos anteriores.

### Estructura General del formato KVN

[INTRO del concepto de clave valor número.](#)

- Un Encabezado.
- Metadatos y datos relativos (datos que describen relaciones entre los objetos).
- Metadatos. (datos respecto a cómo fueron creados los objetos).
- Datos de cada uno de los objetos.
- Comentarios opcionales.

## Estructura General del formato XML

INTRO DE XML. eXtensible Markup Language (XML).  
considerar: time code formats ccstds 301.0-b-41  
xml ccstds 505.0-b-1

```
<header>
</header>
<body>
  <relativeMetadataData>
  </relativeMetadataData>
  <segment>
    <metadata>
    </metadata>
    <data>
    </data>
  </segment>
  <segment>
    <metadata>
    </metadata>
    <data>
    </data>
  </segment>
</body>\\
```

### 2.2.1.1. Ejemplo de CDM

A continuación se muestra un fragmento de ejemplo de un CDM en formato XML. Un ejemplo completo se adjunta en el ([Apéndice](#)).

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<cdm xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation=
"http://sanaregistry.org/r/ndmxml/ndmxml-1.0-master.xsd"
id="CCSDS_CDM_VERS" version="1.0">
<header>
<COMMENT>Sample CDM – XML version</COMMENT>
<CREATION_DATE>2010-03-12T22:31:12.000</CREATION_DATE>
<ORIGINATOR>JSPOC</ORIGINATOR>
<MESSAGE_FOR>SATELLITE A</MESSAGE_FOR>
<MESSAGE_ID>20111371985</MESSAGE_ID>
</header>
<body>
```

```

<relativeMetadataData>
  <COMMENT>Relative Metadata/Data</COMMENT>
  <TCA>2010-03-13T22:37:52.618</TCA>
  <MISS_DISTANCE units="m">715</MISS_DISTANCE>
  <RELATIVE_SPEED units="m/s">14762</RELATIVE_SPEED>
  <relativeStateVector>
    <RELATIVE_POSITION_R units="m">27.4</RELATIVE_POSITION_R>
    <RELATIVE_POSITION_T units="m">-70.2</RELATIVE_POSITION_T>
    <RELATIVE_POSITION_N units="m">711.8</RELATIVE_POSITION_N>
    <RELATIVE_VELOCITY_R units="m/s">-7.2</RELATIVE_VELOCITY_R>
    <RELATIVE_VELOCITY_T units="m/s">-14692.0</RELATIVE_VELOCITY_T>
    <RELATIVE_VELOCITY_N units="m/s">-1437.2</RELATIVE_VELOCITY_N>
  </relativeStateVector>
  <START_SCREEN_PERIOD>2010-03-12T18:29:32.212</START_SCREEN_PERIOD>
  <STOP_SCREEN_PERIOD>2010-03-15T18:29:32.212</STOP_SCREEN_PERIOD>
  <SCREEN_VOLUME_FRAME>RTN</SCREEN_VOLUME_FRAME>
  <SCREEN_VOLUME_SHAPE>ELLIPSOID</SCREEN_VOLUME_SHAPE>
  <SCREEN_VOLUME_X units="m">200</SCREEN_VOLUME_X>
  <SCREEN_VOLUME_Y units="m">1000</SCREEN_VOLUME_Y>
  <SCREEN_VOLUME_Z units="m">1000</SCREEN_VOLUME_Z>
  <SCREEN_ENTRY_TIME>2010-03-13T20:25:43.222</SCREEN_ENTRY_TIME>
  <SCREEN_EXIT_TIME>2010-03-13T23:44:29.324</SCREEN_EXIT_TIME>
  <COLLISION_PROBABILITY>4.835E-05</COLLISION_PROBABILITY>
  <COLLISION_PROBABILITY_METHOD>FOSTER-1992
</COLLISION_PROBABILITY_METHOD>
</relativeMetadataData>

```

## 2.3. La posición de los objetos involucrados

Una vez que se recibe un mensaje, o que algún sistema de alerta ha detectado un acercamiento no deseado, se busca aprovechar toda la información orbital que se tienen hasta ese momento, para poder hacer estimaciones lo más precisas posibles de las posiciones futuras, es decir, para que las propagaciones orbitales al momento de máximo acercamiento sean confiables y faciliten la toma de decisiones.

En nuestro planteo de riesgos de colisión entre misiones operativas y desechos espaciales, existen dos abordajes distintos para la determinación de las posiciones, ya que cada uno de los objetos involucrados utiliza metodologías y modelos diferentes.

### La posición de la misión operativa

**cuanto detallar ?** Con una misión operativa se mantiene el contacto y se la puede comandar. Los sistemas de navegación abordado permiten un registro permanente de las posiciones y velocidades del satélite. La información de esas trayectorias, permite mejorar las determinaciones orbitales que se calculan en tierra, y generar productos con procesamientos a posteriori, de mucha precisión y mejoras

en los modelos de propagación.

Para este trabajo hemos tenido acceso a los productos orbitales de una misión operativa, cuyas efemérides se plasman en archivos de texto plano, tabuladas cada un segundo, en el sistema de referencia verdadero de la fecha TOD. Según se nos informó, los mismos presentan errores del orden de los 20 m. (**comunicacion por mail**).

Esos productos son los que utilizamos en el análisis estadístico para la generación de la tabla que implementamos para la propagación de errores de las matrices de covarianza.

### La posición del desecho espacial

El desecho espacial no tiene capacidades operativas, de manera que la única forma de determinar su posición es mediante las redes de rastreo descritas en la introducción.

Como en Argentina no contamos con capacidad de rastreo, ARxCODE fue diseñado para obtener los datos de los desechos en el formato TLE, que publica NORAD, mediante el sitio web Space-Track. Si bien son los datos más completos y difundidos, utilizar estos datos implica errores no despreciables, y sobre todo desconocidos. Es por eso que debe implementarse algún método que permita inferir errores.

Entre las particularidades que la combinación de la utilización de TLEs y el modelo sgp4 presentan, hay que tener en cuenta que los datos propagados resultan en un sistema de referencia que es propio de este tratamiento, el sistema de ecuador verdadero y equinoccio medio, True Equator Mean Equinox (TEME). Esto implica que deben hacerse transformaciones para poder comparar estas propagaciones con efemérides calculadas por otros medios. (Ver. **Teme2TOD**)

En las secciones siguientes se explicita el formato de los TLEs y se describe el modelo sgp4 que permite la propagación de los mismos.

### Los TLE

El formato TLE es un modo histórico de registro de datos orbitales de los objetos rastreados que orbitan la Tierra. Sus siglas hacen referencia a las Dos Líneas (Two-Line) en las que se plasman los elementos orbitales medios junto con datos adicionales, de un dado objeto, para un instante particular.

Como se detalla a continuación, en la primera línea se indican los identificadores del objeto y el número de lanzamiento del año, el instante en el que fueron calculados los elementos, y parámetros de ajuste, como las derivadas de movimiento medio y el término de frenado atmosférico, BSTAR, que resultan necesarios para la propagación de los TLE con el modelo dinámico SGP4 (Sec. 2.3.1).

En la segunda línea se ubican los elementos orbitales clásicos medios: inclinación, longitud del nodo, excentricidad, argumento del perigeo, anomalía media y el movimiento medio, de donde se extrae el valor del semieje. En este punto es importante resaltar el hecho de que se trata de elementos medios, promediados bajo ciertos criterios y metodologías, no siempre especificadas, de manera que no son una exacta analogía con los elementos orbitales de la posición real para el instante indicado.

Ejemplo de un TLE de la Estación Espacial Internacional (ISS)

**1 25544U 98067A 08264.51782528 -.00002182 00000-0 -11606-4 0 2927**  
**2 25544 51.6416 247.4627 0006703 130.5360 325.0288 15.72125391563537**

### LINE 1 Primera línea del TLE

1 01–01 Número de línea 1  
 2 03–07 Número de satélite 25544  
 3 08–08 Clasificación U  
 4 10–11 Identificador internacional (últimos dígitos del año de lanz.) 98  
 5 12–14 Identificador internacional (número de lanzamiento del año) 067  
 6 15–17 Identificador internacional (piece of the launch) A  
 7 19–20 Época del año (últimos dígitos del año) 08  
 8 21–32 Época (día del año y fracción de la porción de día) 264.51782528  
 9 34–43 Derivada primera del movimiento medio dividida por dos. –.00002182  
 10 45–52 Derivada segunda del movimiento medio. 00000-0  
 11 54–61 BSTAR término de frenado atmosférico. -11606-4  
 12 63–63 El número 0. (originalmente traía el tipo de efemérides) 0  
 13 65–68 Número de set. I  
 14 69–69 Checksum (modulo 10) 7

### LINE 2 Segunda línea del TLE

1 01–01 Número de línea 2  
 2 03–07 Número de satélite 25544  
 3 09–16 Inclinación (grados) 51.6416  
 4 18–25 Ascensión Recta del nodo ascendente. (grados) 247.4627  
 5 27–33 Excentricidad (parte decimal) 0006703  
 6 35–42 Argumento del Perigeo (grados) 130.5360  
 7 44–51 Anomalía Media (grados) 325.0288  
 8 53–63 Movimiento Medio (revoluciones por día) 15.72125391  
 9 64–68 Número de órbita (revoluciones) 56353  
 10 69–69 Checksum (modulo 10) 7

### 2.3.1. SGP4

De acuerdo a una reseña histórica presentada por Hoots (Hoots and Roehrich, 1998), los orígenes del SGP4 se remontan al año 1960 en EE.UU, cuando se desarrolló el modelo General Simplificado de Perturbaciones SGP (*Simplified General Perturbations*). Basado en los modelos analíticos de predicción orbital de Brower and Kozai (citar??) para su implementación, fue adaptado y modificado para evitar singularidades en órbitas particulares y para reducir el tiempo de cómputo. Así mismo se incluyó el efecto del frenado atmosférico.

En 1964 se convirtió en el modelo de predicción orbital principal del sistema de detección y rastreo de los Estados Unidos. Sin embargo, en 1969 la cantidad de objetos catalogados impedían a las computadoras de la época procesar todos los términos del modelo, por lo que fue necesario desarrollar una



nueva versión más simplificada, que resultó en el SGP4 que se puso en operatividad en el año 1970.

Esta última simplificación (Lane and Hoots, 1979 ([citar??](#))) consistió en :

- Retener sólo los principales términos que modelan el efecto secular que produce el frenado atmosférico.
- Restringir el modelo gravitacional de Brower sólo a los términos de período largo o corto, que no contengan a la excentricidad como factor.

La primera versión liberada del código fuente del SGP4 se publicó en el Spacetrack Report Number 3 (Hoots and Roehrich, 1980b).

En 2004 Hoots et al. publicó un documento completo con todas las ecuaciones (incluidas las correspondientes al modelo para espacio profundo); incorporando resonancias, las fuerzas que ejercen otros cuerpos, el drag atmosférico y otras perturbaciones en las técnicas matemáticas.

El SGP4 es actualmente, el único modelo para el mantenimiento del catálogo de objetos a bajas alturas que orbitan la Tierra.

### 2.3.2. Sistemas de Referencia

#### TEME

Es un sistema inercial con origen en el centro de la Tierra, que utiliza como plano fundamental el Ecuador. El eje  $x$  se ubica en el plano del Ecuador y apunta en la dirección del Equinoccio Medio, el eje  $y$  también se ubica sobre el plano ecuatorial a  $90^\circ$  del eje  $x$ , y el eje  $z$  apunta en la dirección del eje de rotación de la Tierra, perpendicular al plano ecuatorial. Sus siglas hacen referencia a un Ecuador Verdadero y un Equinoccio Medio TEME. Si bien no es un sistema convencional estandarizado, es el sistema que utiliza NORAD para la generación y propagación de los TLE, por lo que se encuentra ampliamente difundido.

#### TOD

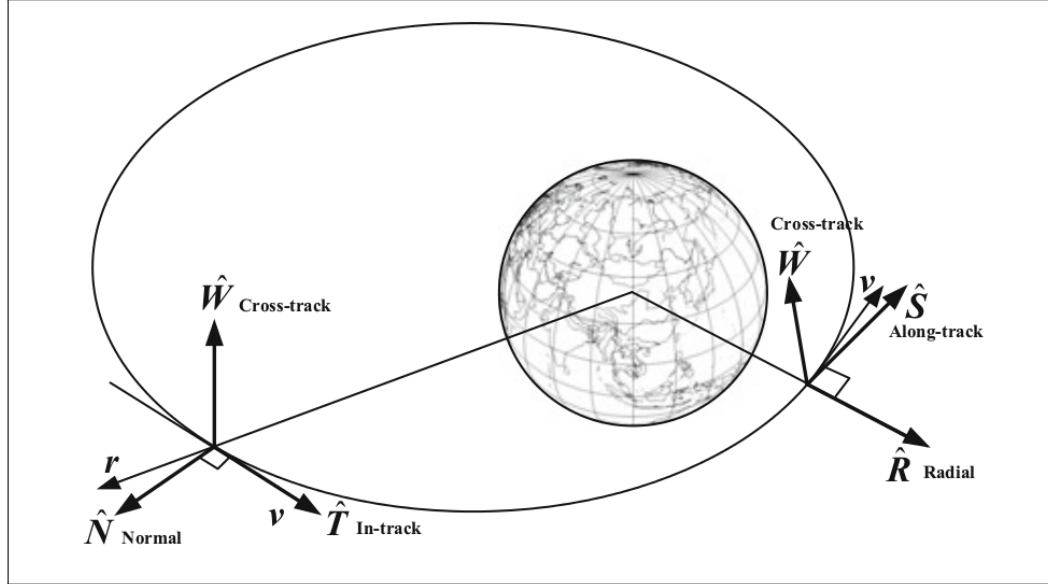
Al igual que el TEME, es un sistema inercial definido con origen en el centro de la Tierra, con plano fundamental el Ecuador. Su eje  $x$  también yace sobre el plano ecuatorial pero se orienta en la dirección del Equinoccio Verdadero (de la fecha).

En el apéndice 7.1 se describe en forma detallada la transformación de coordenadas del sistema TEME al sistema TOD.

#### Sistemas centrados en el objeto

Los sistemas RSW y NTW son dos sistemas con origen centrado en el objeto. Esta característica ofrece ventajas cuando se hacen estudios de movimientos relativos, como en las misiones de sistemas

distribuidos, o en los acoplamientos entre naves y también clarifican la influencia de ciertos efectos perturbativos, como por ejemplo el del frenado atmosférico, muy notorio en la componente a lo largo de la velocidad.



**Figura 2.1:** Sistemas de Referencia centrados en el Satélite - extraído de: Vallado [..buscar](#)

En el sistema **RSW** la coordenada R (radial), tiene la dirección del vector que une el centro de la Tierra con el objeto; la coordenada S (*along-track or transverse*), apunta en la dirección perpendicular al vector R, a lo largo del movimiento pero no exactamente paralela a la dirección de la velocidad (salvo en órbitas circulares o en órbitas elípticas durante el apogeo y el perigeo); la coordenada W (*cross-track*), es perpendicular tanto a R como a S, es decir, normal al plano del movimiento. Este sistema también se encuentra en la bibliografía como UVW, o RTN.

Dado el vector posición  $\vec{r}$  y velocidad  $\vec{v}$  del objeto de referencia, en un sistema inercial, en un momento dado; el sistema **RSW** queda definido a partir de:

$$\bar{R} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}, \quad \bar{W} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{|\vec{r} \times \vec{v}|}, \quad \bar{S} = \bar{W} \times \bar{R} \quad (2.1)$$

El sistema **NTW** define el eje T (tangencial a la órbita) en la dirección de la velocidad (*in-track*); el eje N (normal), en el plano orbital y perpendicular a la velocidad; y la componente W apunta en la dirección perpendicular al plano orbital.

Dado el vector posición  $\vec{r}$  y velocidad  $\vec{v}$  del objeto de referencia, en un sistema inercial, en un momento dado; el sistema **NTW** queda definido a partir de:

$$\bar{T} = \frac{\vec{v}}{|\vec{v}|}, \quad \bar{W} = \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{|\vec{r} \times \vec{v}|}, \quad \bar{N} = \bar{T} \times \bar{W} \quad (2.2)$$

Notar que ambos sistemas dependen de la posición y la velocidad, es decir, que varían con el

tiempo.

### Sistema Geodésico Latitud y Longitud

## 2.4. El tratamiento de los Errores en la posición

Como ya hemos resaltado, la determinación de las posiciones orbitales, siempre acarrea un error; ya sea de medición en los casos de rastreo, de simplificación de los modelos en los casos analíticos o de aproximaciones en los casos numéricos.

Conocer los errores requiere un tratamiento particular más y es fundamental en la evaluación del riesgo de colisión.

En este trabajo organizamos el tratamiento de errores en dos grandes secciones, en primer lugar, hay que tener en cuenta que en nuestro planteo siempre estará implicado un desecho, por lo que será necesario conocer los errores que resultan de estos productos, ya que los mismos no son publicados. A tal fin, implementamos el método de construcción de matrices de covarianzas que propone Oswiler (Oswiler, 2006). Este método permite construir una matriz de covarianzas para la posición de un TLE, utilizando el set de TLEs de los últimos 15 días anteriores al TLE en cuestión. Es decir, es un método que permite una estimación de error sobre una posición que ya ha sido determinada, por rastreo para alguna época del pasado.

En segundo lugar, para el análisis de la situación del encuentro, será necesario contar con una técnica que ofrezca los errores de las posiciones que se propagan hacia el futuro, es decir, hacia el momento del máximo acercamiento, TCA. En este punto radica el aporte de nuestro trabajo, ya que proponemos una forma para calcular la propagación de errores, a partir de estudios estadísticos del comportamiento de errores de los TLE (Sec. 2.4.2).

### 2.4.1. Método de Oswiler

Es un método que propone una manera de estimar los errores que se comenten en la utilización de TLEs para la determinación de la posición y la velocidad de un objeto que orbita la Tierra. El mismo consiste en utilizar un set de TLEs de un intervalo de dos semanas, y considerar el último TLE del set, al que denomina *Primario* como el valor real o verdadero.

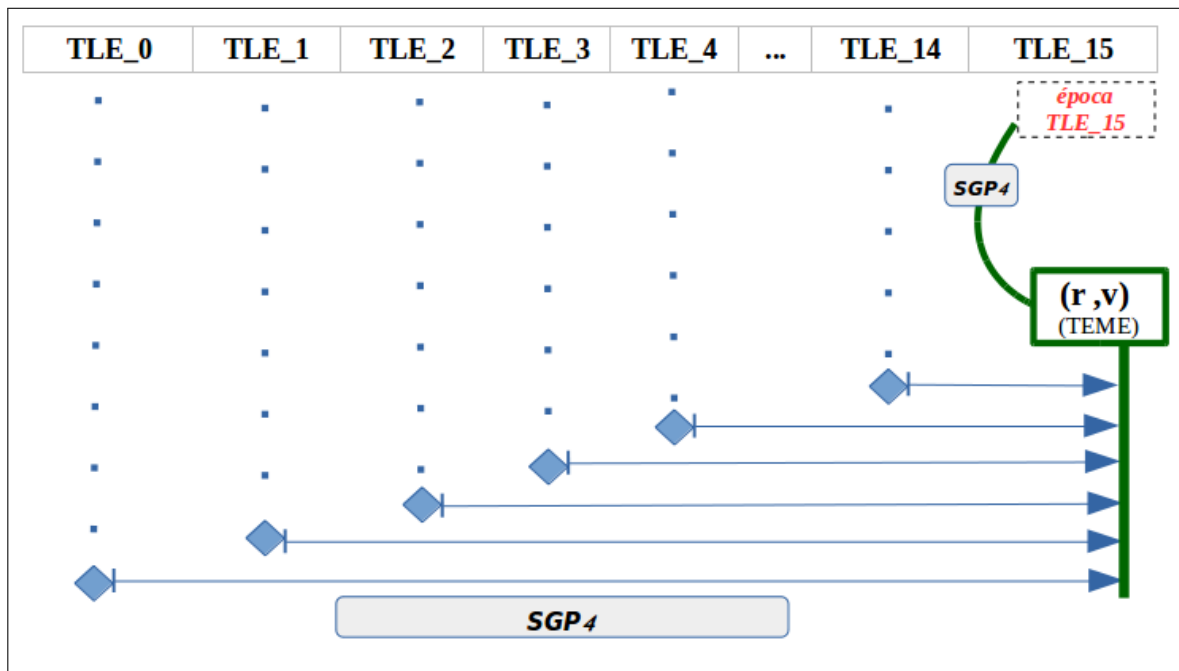
A partir de esa premisa, propaga los TLEs anteriores hasta la época del TLE Primario y con las diferencias que resultan de la comparación, realiza los cálculos estadísticos de los valores medios y las varianzas, para construir la matriz Varianza Covarianza correspondiente al TLE Primario.

- N la cantidad de TLEs del set.
- $\bar{X}_{epoca}$  = Estimación del valor verdadero para la época.
- $\delta X_{epoca}$  = Residuos que se generan de la comparación del valor verdadero con los valores propagados.

- $m$  = Valores medios de los residuos.
- $P$  = Matriz de covarianza.

$$m = \sum_{i=1}^{N-1} x_i \frac{(\delta X_{epoca})_i}{N-1} \quad (2.3)$$

$$P = \sum_{i=1}^{N-1} x_i \frac{(\delta X_{epoca} - m)_i (\delta X_{epoca} - m)_i^T}{N-1} \quad (2.4)$$



**Figura 2.2:** Esquema del método de Osweiler para la generación de la matriz de covarianza a partir de un set de TLEs

### 2.4.2. Propagación de errores

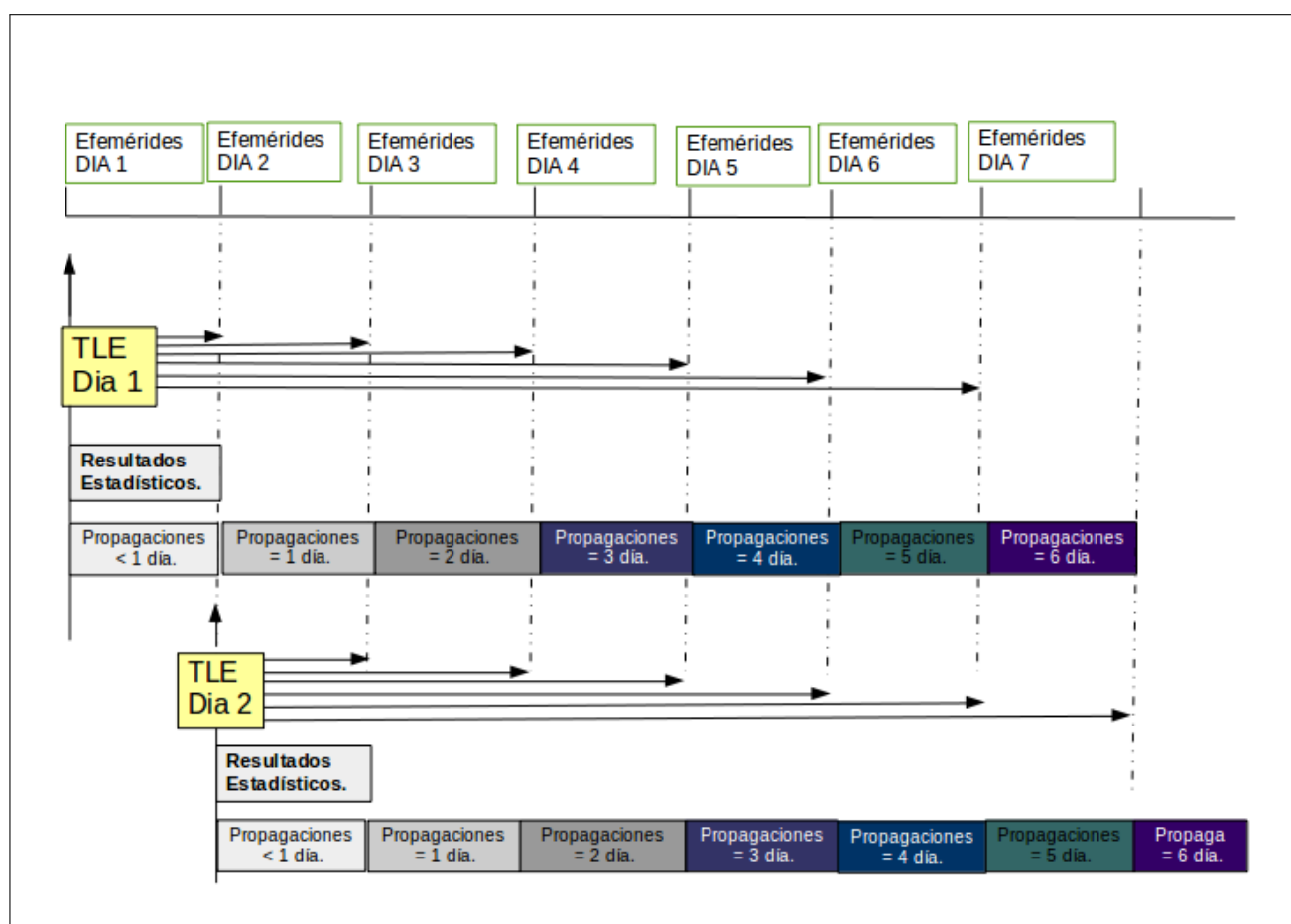
Una vez que ya se conoce la matriz de covarianza del desecho para el momento de la recepción del alerta, será necesario propagar esos errores al momento de máximo acercamiento.

Dado que se desconocen los errores que introduce el propagador sgp4, fue necesario pensar una metodología que permita hacer una estimación independiente.

Se propone un método que utiliza estadística sobre datos históricos de misión, comparados con los valores que arrojan las propagaciones con TLEs. Se evalúa la tendencia y se calculan valores medios para los errores en la propagación, en función de la cantidad de días que se propaguen.

El procedimiento es el siguiente (Fig. 2.3):

- Se selecciona un intervalo de 6 meses.
- Se extraen los productos orbitales de la misión operativa tabulados cada un segundo.
- Se solicitan los TLEs de la misión para el intervalo.
- Se toma el TLE del primer día y se lo propaga cada un segundo, para los próximos 7 días.
- Se comparan las efemérides de dinámica orbital con los valores que resultan de los TLEs propagados.
- Se calculan las varianzas en las coordenadas R, T y C, para cada día.
- Se toma el TLE del día siguiente y se repite el procedimiento.
- Se realiza la estadística de las diferencias agrupadas según sean de horas hasta 6 días.
- Se plasman los resultados en una tabla que luego será usada por ARxCODE.



**Figura 2.3:** Esquema del método propuesto para la estimación de la propagación de errores al utilizar TLEs y el propagador sgp4. Los recuadros verdes contienen las efemérides que calcula dinámica orbital. Cada uno de los TLEs se propagan para cada segundo, durante 7 días hacia adelante, y se comparan los valores de cada instante propagado con las efemérides de dinámica orbital. Aquí sólo se muestran 2, pero el proceso se repite para los 6 meses del intervalo.

## 2.4 EL TRATAMIENTO DE LOS ERRORES EN LA POSICIÓN

Propagación < 1 día.				Propagación = 1 día.				Propagación = 2 días.			
Fecha	VAR_R_0	VAR_I_0	VAR_C_0	Fecha	VAR_R_1	VAR_I_1	VAR_C_1	Fecha	VAR_R_2	VAR_I_2	VAR_C_2
20130101	0.060453596	0.528316758	0.027239942	20130102	0.045175176	0.470122254	0.023149911	20130103	0.029450037	0.416814434	0.021287172
20130102	0.058517621	0.525139266	0.022524736	20130103	0.039903010	0.459809956	0.022113536	20130104	0.030223626	0.400003917	0.041473197
20130104	0.045217846	0.470216864	0.043683128	20130105	0.034371541	0.413039926	0.089495667	20130106	0.023079058	0.394817157	0.177012333
20130105	0.055433116	0.499688192	0.075247436	20130106	0.039010810	0.458420938	0.154652581	20130107	0.026648599	0.394123585	0.261184440
20130106	0.058731382	0.538625156	0.153626256	20130107	0.042209993	0.455411064	0.260425783	20130108	0.032798592	0.396881981	0.379696601
20130108	0.043612585	0.439368580	0.384121132	20130109	0.031825667	0.444445189	0.467655131	20130110	0.019985254	0.410819087	0.485950968
20130109	0.047140219	0.495629958	0.465750342	20130110	0.031362044	0.441377185	0.481372460	20130111	0.023651737	0.367866831	0.451983580
20130110	0.032739544	0.429423645	0.501850158	20130111	0.024899111	0.384111210	0.469716159	20130112	0.019289379	0.354068975	0.373653487
20130111	0.041621277	0.501792881	0.462903291	20130112	0.031308916	0.406835465	0.366777495	20130113	0.021029890	0.379985102	0.267988078
20130112	0.049098167	0.497079013	0.369773021	20130113	0.034204671	0.433951665	0.268320138	20130114	0.023758093	0.397343537	0.169358195
20130113	0.045648160	0.479396903	0.281587529	20130114	0.032376514	0.426360074	0.177613141	20130115	0.024797946	0.376676749	0.094182971
20130114	0.046996917	0.510765329	0.166559591	20130115	0.036514133	0.447492736	0.088285408	20130116	0.026440985	0.391858540	0.039735474
20130116	0.046329322	0.474906016	0.037406056	20130117	0.030787699	0.426038104	0.021622579	20130118	0.023226431	0.421995916	0.022333342
20130117	0.042152467	0.469096111	0.021513055	20130118	0.032425533	0.431622586	0.023619533	20130119	0.024467554	0.376061065	0.023947896
20130118	0.056435666	0.510196375	0.026115354	20130119	0.042905833	0.449146603	0.027079441	20130120	0.029284779	0.416112786	0.025673551
20130119	0.058882015	0.515593086	0.029308831	20130120	0.041777725	0.465154740	0.027468247	20130121	0.028889890	0.413917782	0.022768126
20130120	0.058915143	0.535101150	0.028190622	20130121	0.042477943	0.468084272	0.023377084	20130122	0.033086952	0.415217219	0.021354457
20130121	0.056832400	0.532127821	0.024247308	20130122	0.044960875	0.467683465	0.022035479	20130123	0.033030199	0.420100109	0.043058205

**Figura 2.4:** Fracción de tabla con el total de datos calculados para la estimación estadística. Se muestran sólo algunos días (primera columna de cada set) de los 6 meses, y los agrupamientos según sean respecto a propagaciones < 1 día, = 1 día o = 2 días

A partir de las diferencias calculadas para cada segundo de cada día, se calculan valores medios y varianzas, por día. (**considera las del día anterior?? es acumulativo??**).

Luego se agrupan los valores según el intervalo de propagación, es decir, si son valores medios y varianzas de haber propagado 1, 2, 3 ... o hasta 6 días, y se toman los valores medios. Los resultados finales se plasman en una tabla cuyas columnas indican los valores medios de las varianzas por coordenada, y las filas los valores medios de las varianzas por intervalo propagado.

**Tabla 2.1:** Resultados finales de los valores medios de las varianzas calculadas

	$\sigma_r[km]$	$\sigma_t[km]$	$\sigma_n[km]$
<1 día	0.05287535953	0.5110606907	0.09802202353
1 día	0.03846388969	0.4517572281	0.09807457894
2 días	0.02760890529	0.4086434248	0.09904162392
3 días	0.01963580775	0.3765098311	0.09022336881
4 días	0.01469071678	0.3577884914	0.1182060362
5 días	0.01332578794	0.3557767231	0.1264764812
6 días	0.01524829841	0.365815954	0.1607439516

## 2.5. La Probabilidad de Colisión

Dados dos objetos, en nuestro caso una misión operativa: *sat*, y un desecho: *deb*, de los cuales conocemos su posición  $P_{sat}$  y  $P_{deb}$  y las matrices de error asociadas a esas posiciones para un tiempo inicial:  $t_0$ . Todo referenciado al mismo sistema inercial de referencia, ya sea un sistema geocéntrico (Earth Centered Inercial (ECI)) o el propio sistema del satélite (Radial, Transverse, Normal (RTN)). Sea TCA el instante de máximo acercamiento entre ellos. Bajo ciertos criterios (ej: Sec. 2.2.1) estos objetos estarán en una situación de encuentro.

Los encuentros pueden clasificarse según sean:

- Encuentros cortos: se asume que movimiento relativo presenta comportamiento lineal durante el breve lapsus del encuentro.
- Encuentros largos: el encuentro no es lo suficientemente corto como para considerar movimiento relativo lineal.

En particular en este trabajo, analizamos las situaciones de encuentros cortos. En los encuentros cortos puede asumirse que:

- El movimiento relativo es lineal.
- Los errores en la posición durante el encuentro son constantes e iguales al del error en TCA.
- No hay errores en la velocidad.
- Los errores en la posición se representan con una distribución gaussiana de tres dimensiones.

Métodos para el cálculo de la PoC en *encuentros cortos*:

De acuerdo al estudio del libro de (Lei et al., 2017), la *probabilidad de colisión* será:

La probabilidad de que la mínima distancia entre los objetos sea menor a la suma de sus radios seguros.

En un cálculo simplificado de la probabilidad de colisión, las incertezas se combinan y los radios se suman en el TCA. Los resultados se proyectan en un plano perpendicular al vector velocidad relativa y en este plano, la probabilidad de colisión se calcula como una integral doble de la función densidad de probabilidad sobre el área de corte circular.

Esta integral no tiene solución analítica y se resuelve mediante métodos numéricos de alta precisión y bajo costo.

Los resultados del cálculo son sensibles a:

- La geometría del encuentro.
- La matriz de covarianza.

## 2.5 LA PROBABILIDAD DE COLISIÓN

Autor/es	Metodología
Akella y Alfriend	Calcula la integral de superficie, del problema simplificado a 2D.
Foster	Calcula la integral de superficie del problema simplificado a 2D, utilizando la suma acumulada de anillos elípticos concéntricos. Transforma el sistema a un sistema de referencia polar, e integra cada $0,5^\circ$ y un radio de $r_a/12$ . Es el método que utiliza NASA para la ISS.
Chan	Desarrolló una solución analítica en base a una serie infinita de términos que converge para la mayoría de los valores más comunes del problema, a saber: radios combinados $r_a$ entre $1 - 100m$ , distancias mínimas de $10m - 100km$ y covarianzas en el rango de $1m - 10km$ .
Patera	Transforma la integral de superficie a una integral de línea de una dimensión. Este nuevo planteo permite adaptar la sección de superficie a la forma de los objetos.
Alfano (Serie)	Utiliza una serie que combina las funciones error y términos exponenciales para aproximar la integral de 2D.
Alfano (Prob. Máxima)	Expresión simplificada que permite hacer una estimación grosera cuando no se cuenta con datos precisos de posición o de la matriz de covarianza. Utiliza una relación entre los radios combinados y la mínima distancia.

- El tamaño de los objetos.

Como ya hemos mencionado, el análisis de una situación de riesgo puede realizarse tomando como parámetro:

(Introducir un párrafo para la idea general)

- La mínima distancia.
- La probabilidad de Colisión (PoC).
- La máxima PoC.

Estos parámetros se calculan a partir de:

- Órbitas Predichas.
- Covarianzas.

Luego se juzgan márgenes para las acciones a seguir según criterios propios del centro de control, que tiene en cuenta distintas consideraciones propias de la misión.

Distintos autores han desarrollado varios métodos para el cálculo de la PoC (Patera, Klinkrad, Akella & Alfriend ... **citar bien, y detallar un poco los rasgos generales de cada uno**). Todos ellos comparten las siguientes consideraciones:

- El error en la posición puede representarse por una función de distribución Gaussiana 3D, cuya función de densidad de probabilidad se detalla en la eq...**bla**



- Tanto el objeto primario, como el desecho se mueven en movimiento rectilíneo con velocidad constante durante el encuentro.
- Los errores en las velocidades se desprecian.
- Los errores en las posiciones del objeto primario y del desecho no están correlacionados.
- Los errores en las posiciones son constantes durante el encuentro, al igual que la matrices de covarianzas correspondientes al TCA.

## Método de Akella

En este trabajo para el cálculo de la PoC se utilizará el método de Alfriend & Akella (Akella and Alfriend, 2000) ya que es conceptualmente simple y aunque tiene un alto costo computacional, es realizable por las máquinas actuales en tiempos menores a un segundo.

El mismo requiere como entradas:

- Conocer el instante de máximo acercamiento: TCA (Time of Closest Approach).
- La posición relativa del desecho respecto al objeto primario en el TCA.
- La velocidad relativa del desecho respecto al objeto primario en el TCA.
- Las matrices de error de ambos objetos.

En los momentos próximos al encuentro, la posición relativa de riesgo  $\Delta r$  puede expresarse en función de un intervalo de tiempo respecto del TCA, es decir,  $\Delta t_{tca} = t - t_{tca}$ .

$$\Delta r(t) = \Delta r_{tca} + \Delta v_{tca}(t - t_{tca}) \quad (2.5)$$

Las matrices de covarianza de los errores que son calculadas para un momento dado  $t$  previo al TCA, deben ser propagadas. (**ver metodología**) Dado que consideramos que los errores en las posiciones de ambos objetos no están correlacionadas, ambas contribuciones pueden combinarse en una única matriz, a partir de la suma de ambas.

$$C = C_p + C_d \quad (2.6)$$

De  $C$  sólo consideraremos la submatriz superior de la izquierda de dimensiones (3x3), que corresponde a los errores en las posiciones, con un  $1\sigma$ .

Dado que además asumimos que los errores en la posición son de distribución normal en 3D, la función densidad de probabilidad  $p(\Delta r)$  en momentos próximos al máximo acercamiento queda definida por la expresión **eq .2.7**:

$$p(\Delta r) = \frac{1}{\sqrt{((2\pi)^3 \det(C))}} \exp\left[-\frac{1}{2} \Delta r^T C^{-1} \Delta r\right] \quad (2.7)$$

Sean  $R_t$  y  $R_r$  los radios de las esferas que encierran a nuestra misión principal y al desecho de riesgo, respectivamente. Se considera una situación de *encuentro* o *riesgo de colisión*, al hecho de

que estas esferas se intersecten, o lo que es lo mismo, si ocurre un acercamiento dentro de una esfera de *radio de colisión*  $R_c$ , sección  $A_c$ , volumen  $V_c$ .

$$R_c = R_t + R_r \quad A_c = \pi R_c^2 \quad V_c = \frac{4}{3} \pi R_c^3 \quad (2.8)$$

La probabilidad de colisión  $P_c$  se calcula a partir de la integral de volumen de la función densidad de probabilidad (eq) sobre la región esférica  $V_c$ , centrada en el desecho de riesgo.

$$PoC = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^3 \det(C)}} \int_{V_c} \exp\left[-\frac{1}{2} \Delta r^T C^{-1} \Delta r\right] dV \quad (2.9)$$

Puede demostrarse que esta integral de volumen puede reducirse a una integral de superficie mapeando el elipsoide de los errores en la posición, en contornos elípticos de probabilidad constante sobre el B-plane (**citar a Foster**).

El B-plane es perpendicular al vector velocidad relativa  $\Delta v_{tca}$  en el momento de máximo acercamiento. A su vez, el vector  $\Delta r_{tca}$  yace en el B-plane, como deja ver la ecuación de **zero-transit of the range-rate between the two objects**:

$$\frac{\Delta v_{tca} \Delta r_{tca}}{\Delta r_{tca}} = \dot{r}_{tca} = 0,0 \quad \rightarrow \quad t_{tca} \quad (2.10)$$

Definamos los vectores directores unitarios del plano como  $X_B$  y  $Y_B$ , de acuerdo a las expresiones:

$$X_B = \frac{\Delta r_{tca}}{|\Delta r_{tca}|} \quad Y_B = \frac{(\Delta r_{tca}) \times (\Delta v_{tca})}{|(\Delta r_{tca}) \times (\Delta v_{tca})|} \quad (2.11)$$

A partir de estos vectores unitarios, se construye la matriz de transformación  $R_{X_B, Y_B}$  que mapea las matrices de covarianza en tres dimensiones  $C = C_{x,y,z}$  a matrices de dos dimensiones en el B-plane  $C_B$ .

$$C_B = C_{X_B, Y_B} = R_{X_B, Y_B} C R_{X_B, Y_B}^T \quad (2.12)$$

$$R_{X_B, Y_B} = \begin{pmatrix} X_{B,X} & X_{B,Y} & X_{B,Z} \\ Y_{B,X} & Y_{B,Y} & Y_{B,Z} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Los ejes principales de los contornos elípticos de probabilidad constante, quedan determinados a partir de los autovalores  $\lambda_{i,B}$  ( $i = 1, 2$ ) y los autovectores  $\bar{e}_{i,B}$  que resuelven la ecuación:

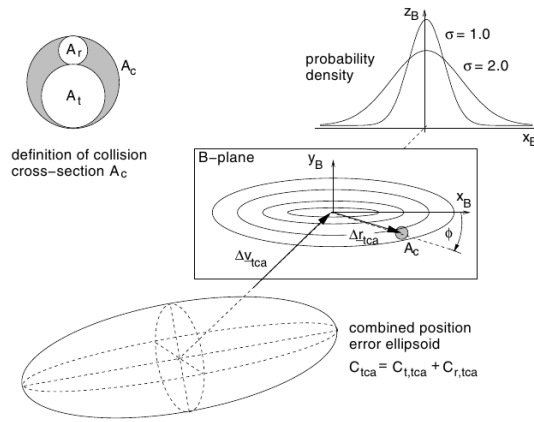
$$(C_B - \lambda_{i,B} I) \bar{e}_{i,B} = \bar{0} \quad (2.14)$$

Donde  $I$  es la matriz identidad  $2 \times 2$ .

Ahora, sea la elipse que representa los errores de posición de  $1\sigma$  en el B-plane:

- El **semieje mayor** queda definido por:  $a_{1\sigma,B} = \sqrt{\max(\lambda_{1,B}, \lambda_{2,B})}$
- El **semieje menor** queda definido por:  $b_{1\sigma,B} = \sqrt{\min(\lambda_{1,B}, \lambda_{2,B})}$
- La **dirección del semieje mayor** será  $\bar{e}_{a,B}$ , con vector unitario:  $\bar{x}_B = \frac{\bar{e}_{a,B}}{|\bar{e}_{a,B}|}$
- La **orientación de  $\bar{e}_{a,B}$**  respecto a la dirección de la conjunción  $X_B$  la indica el ángulo  $\Phi_B$  (ver 2.5)

$$\Phi_B = \arccos(\bar{x}_B, X_B) \quad (2.15)$$



**Figura 2.5:** B-plane (Adaptado de ....)

Bien, consideremos ahora una posición relativa de acercamiento  $\Delta r_B$  ya proyectada en el B-plane. La integral de volumen de la probabilidad de colisión de la Eq. 2.9 se reduce a una integral de superficie sobre la sección circular de colisión  $R_c$ , proyectada en el B-plane y centrada a la distancia relativa predicha en el instante de máximo acercamiento,  $\Delta r_{tca}$

$$P_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{\det(C_B)}} \int_{-R_c}^{+R_c} \int_{-\sqrt{R_c^2 - x_B^2}}^{+\sqrt{R_c^2 - x_B^2}} \exp[-A_B] dy_B dx_B \quad (2.16)$$

$$A_B = \frac{1}{2} \Delta r_B^T C_B^{-1} \Delta r_B \quad (2.17)$$

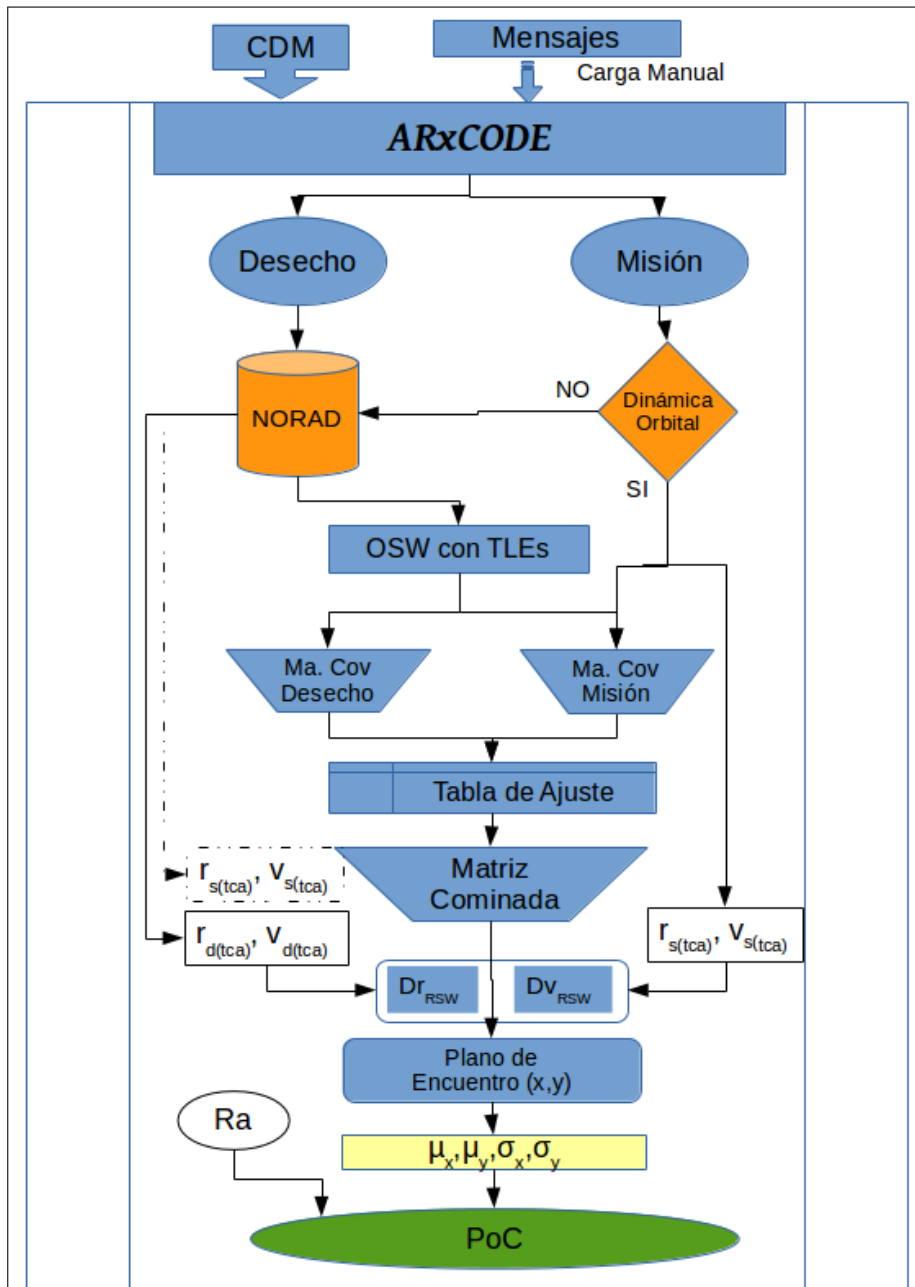
## Resumen

A partir de la recepción de información respecto de una posible colisión, ya sea mediante un mensaje estandarizado CDM o mediante otros medios, se inicia un análisis de la situación.

A tal fin Fig. 2.6:

- Se identifican los objetos involucrados, y se extra su identificador en NORAD y el TCA.

- Se solicitan los TLEs de los últimos 15 días, más próximos a la fecha del encuentro para el desecho y para la misión operativa en caso de no contar con datos más precisos. Si para la misión operativa se contara con productos orbitales propios se utilizarán los errores calculados asociados a los mismos.
- Se calcula la matriz de covarianza con el método de Osweiler para el desecho (y para la misión si los datos orbitales de la misma no se conocieran).
- Se propagan ambas matrices hasta el TCA utilizando los datos estadísticos de la tabla generadas, según la cantidad de días que se necesite propagar.
- Se reúne toda la información y se calcula la probabilidad de colisión.



**Figura 2.6:** Esquema del Procedimiento General del cálculo de PoC

## Metodología de Desarrollo

Para el desarrollo de este trabajo se optó por un modelo de desarrollo de tipo incremental (que resulta iterativo por naturaleza). En cada iteración, se optimizó el diseño y se fueron agregando nuevas funcionalidades y capacidades al sistema.

El problema que nos propusimos resolver, requería de la implementación de distintos algoritmos en una estructura acoplada, es decir que los resultados de un módulo se utilizan en el siguiente. Esto implica que para un análisis completo cada una de las instancias debían estar previamente validadas. No obstante, las salidas de los módulos que eran ingesta de otros módulos podían reemplazarse por datos ya conocidos, y así desarrollar y validar el módulo siguiente, mientras se analizaba en paralelo cómo mejorar o corregir los resultados no satisfactorios. De esta manera se fue armando la estructura general del software a gran escala, y luego revisando y afinando cada uno de los paquetes.

Esta forma de trabajo nos permitió separar la complejidad del proyecto, y a su vez, desarrollar una estructura de biblioteca fácilmente modificables, sin alterar la estructura central.

### 3.1. Inicialización

En esta primera etapa evaluamos el concepto del ARxCODE en el contexto de la Unidad de Desarrollo de Desechos Espaciales de CONAE. Fundamentalmente la vinculación con el departamento de Dinámica Orbital y los procedimientos actuales que se realizan en relación a los riesgos de colisión con desechos.

Hicimos un estudio de las estructuras orgánicas existentes y los sistemas asociados. Los distintos tipos de productos y usuarios, las interfaces que existen y el acceso a los datos reales con los que podríamos contar.

Analizamos cómo trabajan otras agencias espaciales la temática y concluimos qué es lo que podría

ofrecerse y bajo qué premisas.

De las consideraciones más importantes que se desprendieron de esta etapa, cabe destacar que se decidió un prototipo para funcionar montado sobre el software principal de Dinámica Orbital, como un anexo que no interfiere de ninguna manera con los procesos actuales.

Por otro lado, debido a la complejidad del problema y sus consecuencias, será un software diseñado para ser utilizado por un analista experto, con conocimientos de Dinámica Orbital.

En el mismo sentido, sus productos finales no serán considerados en la toma de decisiones hasta tanto sus resultados no hayan sido validados durante un periodo suficiente, que permita verificar y mejorar su funcionamiento, validándolo con un acumulado de situaciones reales.

Para este planteo de definiciones, contamos con el asesoramiento y el intercambio de información con personas de Dinámica Orbital y otros departamentos de CONAE. Realizamos algunas reuniones e intercambio de mails, aunque por ser una temática que se aborda bajo regímenes especiales de acuerdos de confidencialidad, no fue posible contar con la totalidad de la información.

## 3.2. Iteración

Ya conocido el planteo del problema, las distintas maneras de abordarlo y las restricciones que resultan, elaboramos un diseño preliminar del producto con sus requerimientos (Sec. 4.2) y sus funcionalidades, que dadas las características del problema resultan bastante deterministas.

Para el desarrollo definimos distintos paquetes o componentes (Sec. 4.5):

- Paquetes de Procesamiento: *AjustarTle*, *Comparar*, *Encuentro*, *Estadística*.
- Paquetes de Administración de Datos: *TleAdmin*, *CodsAdmin*, *CDM*.
- Paquetes Generales de utilización múltiple: *SistReferencia*, *Validación*.
- Paquetes de visualización e interfaz gráfica: *Aplicación*, *visual*.

Esta metodología nos permitió importar funciones que resuelven cuestiones específicas desde cualquier módulo y a su vez modificar las funciones cuando fuera necesario.

Cuando empezamos con el diseño y el desarrollo de la interfaz, fuimos modificando mucho las opciones, en tanto utilizamos la interfaz para seguimiento de pasos intermedios que a medida que iban siendo validados se iban retirando de las opciones del usuario.

## 3.3. Control

Al tratarse de un sistema que implementa distintas metodologías para el cálculo de parámetros, el control se basó en analizar que los resultados de los algoritmos implementados fueran coherentes y coincidieran con los que existían en publicaciones que pudiéramos reproducir.

Fue fundamental implementar un control sobre la implementación de la solicitud y propagación de los datos TLE y sobre los algoritmos de transformación de coordenadas.

Para cada una de las instancias de validación se configuraron distintos escenarios de prueba y en muchas oportunidades se verificaron los resultados parciales, con pruebas realizadas con otros programas como Excel.

## 3.4. Entorno de Desarrollo

Para el desarrollo utilizamos:

- Plataforma de Desarrollo (Integrated Development Environment (IDE)): Eclipse Ver. 3.8.1.
- Leguaje de Programación: Python 2.7
- Biblioteca de Interfaz gráfica: QT por medio del enlace PyQT.
- Gestor de Configuración: Git.
- Generador de Documentación: Doxygen.
- Bibliotecas utilizadas: SGP4 (Brandon Rhodes)

### Eclipse

Eclipse (Ver. 3.8.1) es una plataforma de desarrollo multiplataforma ampliamente utilizada y ya muy madura, cuya estructura de perspectivas, editores y vistas, facilita el desarrollo en distintos lenguajes de programación. En nuestro caso incorporamos el IDE para python, *Pydev*.

Eclipse ofrece excelentes capacidades para la gestión de proyectos, permitiendo incorporar en un mismo proyecto distintos archivos y documentación, que en nuestro caso agrupó no sólo los datos de entrada y salida, como los TLE, los CDM o los productos orbitales; sino que también incluyó todos los ploteos y gráficos que resultaban de los procesamientos y la propia documentación referida a la escritura de esta tesis. Esto fue muy productivo en lo que respecta al control de versiones, ya que se aprovechó el hecho de que Eclipse ya tiene incorporado el Git.

Cabe destacar también, que ofrece una excelente herramientas de depuración.

### Python

El lenguaje de programación Python se destaca en sus capacidades tanto de cálculo como de manejo de texto. Esto agiliza mucho los procesos que involucran el manejo de tablas de datos plasmadas en texto plano, como son por ejemplo los datos TLE y las efemérides orbitales que se generan como productos del departamento de Dinámica Orbital. Así mismo facilita el manejo de las nomenclaturas de los distintos archivos de datos o imágenes generadas. (Referencia correlacional ;?)



Existen numerosas, potentes y optimizadas bibliotecas para la realización de cálculos, y el tratamiento vectorial. En nuestro caso explotamos particularmente la biblioteca *numpy*, y muy poco de *scipy* para interpolar datos específicamente.

Finalmente su utilización masiva permite tener acceso rápido a sus potencialidades.

## QT

Para el desarrollo de la interfaz gráfica se utilizó QT, a través del enlace PyQT.

QT es un framework ampliamente utilizado para el desarrollo de aplicaciones multiplataforma. Cuenta con mucha contribución de la comunidad y está soportado por Nokia.

Su mecanismo de conexión de señales y eventos es simple, esto permite definir los eventos sencillos en la estructura del GUI, y luego invocar el código python con las acciones más avanzadas.

Subyace su implementación en C++ que muchas veces dificulta la comprensión para los que estamos familiarizados con la lógica del python, y lo mismo ocurre con la documentación y prevalecen los ejemplos para C++.

## Git

Si bien, esta herramienta no fue aprovechada en todo su potencial en este trabajo, por tratarse de un proyecto sencillo y desarrollada por dos personas, fue fundamental para agilizar la posibilidad de trabajar desde cualquier computadora, siempre en la última versión del proyecto.

Así mismo, el trabajo con control de versiones, permitió realizar distintas pruebas e implementaciones que luego se descartaron o se quitaron del producto final, pero que pueden ser reutilizados en futuros proyectos. En particular en la utilización de la interfaz intermedia que fue generada para una ágil evaluación de los resultados parciales.

## Doxygen

....

## SGP4 en python

## ARxCODE

### 4.1. Especificaciones generales

ARxCODE es un prototipo de software diseñado para el procesamiento y análisis de encuentros con riesgo de colisión, entre misiones operativas y desechos espaciales.

Tiene como objetivo principal procesar la información, proveniente de los organismos internacionales de alerta (mensaje CDM), o cargada manualmente, y facilitar al operador la visualización de los parámetros de la situación en forma clara para su correcta interpretación y comunicación.

Es una aplicación de escritorio, de estructura modular, reusable y modificable que cuenta con una interfaz amigable.

Pensada con una filosofía de expansión y perfeccionamiento, su arquitectura permite la adición de funcionalidades sin mayores inconvenientes.

### 4.2. Requerimientos

Se pretende que ARxCODE sea una herramienta que oficie de soporte al operador en el diálogo con los organismos internacionales que proveen los mensajes de alerta, frente a una situación de riesgo de colisión. A tal fin, el sistema debe tener la capacidad de interpretar los mensajes estandarizados CDM y presentar la información que allí se registra, en forma clara al operador.

Por otro lado, debe tener la capacidad de coleccionar datos ingresados manualmente por el operador y ofrecer los parámetros que resulten del procesamiento propio del ARxCODE, como mínima distancia, TCA calculado y PoC.

Esta última funcionalidad implica que ARxCODE debe poder solicitar a la página Space-Track los TLEs correspondientes a los objetos involucrados, debe poder estimar las matrices de covarianza de ambos objetos, ya sea mediante el método de Osweiler o incorporando efemérides predichas del departamento de dinámica orbital; debe poder propagar esos errores al momento del TCA y finalmente calcular la PoC, con un **error aceptable**.

En la tabla 4.1, se listan todos los requerimientos del sistema.

## 4.3 INTERFACES

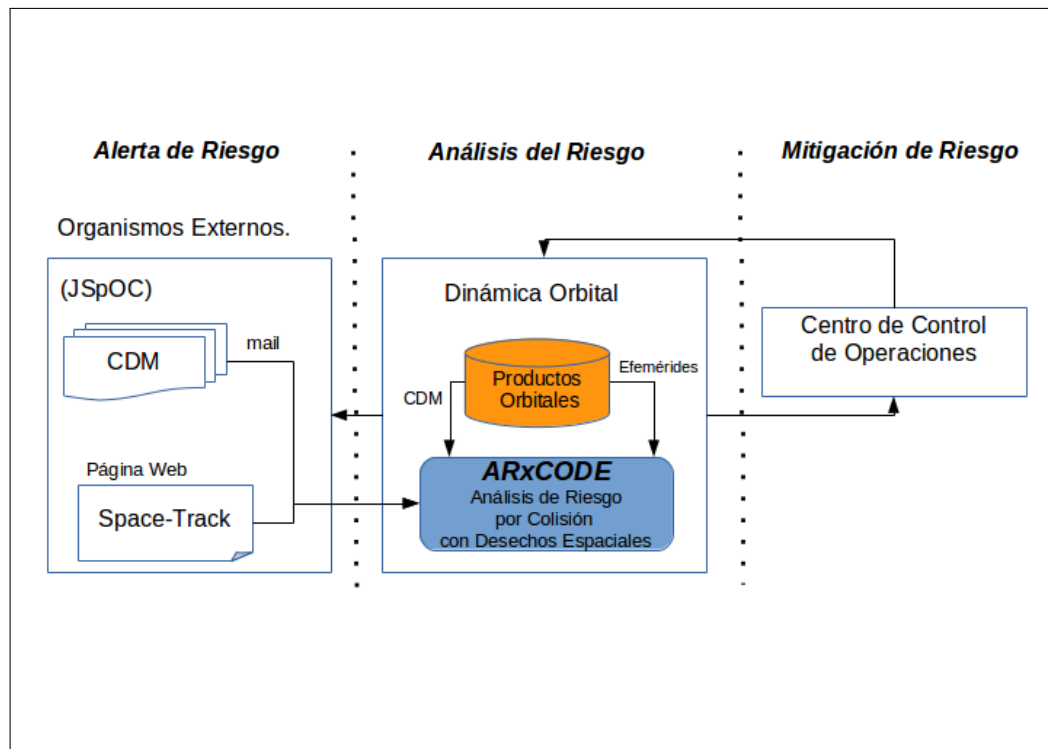
Req. ID	Descripción
1	Requerimientos FUNCIONALES
ARR-010	ARxCODE debe calcular la probabilidad de colisión de un acercamiento de riesgo.
ARR-020	ARxCODE debe aceptar como inputs: un mensaje de alerta (CDM), o los identificadores de NORAD de ambos objetos y el tiempo de máximo acercamiento (TCA).
ARR-030	ARxCODE debe utilizar los productos orbitales de la misión o realizar el mismo procedimiento que se aplica al desecho, a la misión.
ARR-040	ARxCODE debe calcular la mínima distancia, total y en la coordenada radial.
ARR-050	ARxCODE debe manipular los sistemas de referencia: TEME, TOD y RTN.
ARR-060	ARxCODE debe permitir al operador analista experto visualizar el encuentro, generar reportes y notificaciones.
ARR-070	ARxCODE debe extraer el set de TLEs de los objetos involucrados de los últimos 15 días anteriores al TCA.
ARR-080	ARxCODE debe estimar los errores en la posición inicial del desecho y de la misión operativa.
ARR-090	ARxCODE debe propagar los errores de la posición inicial al TCA.
2	Requerimientos de INTERFACES
ARR-100	ARxCODE deberá permitir la carga manual de la situación de encuentro.
ARR-110	ARxCODE deberá descargar los TLE de Space-Track.
ARR-120	ARxCODE deberá manipular los CDM con formato xml.
3	Requerimientos de RENDIMIENTO y/o PERFORMANCE
ARR-210	ARxCODE deberá ofrecer el reporte de la situación en no más de 1 minuto.
4	Requerimientos de VALIDACIÓN
ARR-300	Los módulos de implementación de metodologías de ARxCODE serán validados con los resultados de las publicaciones pertinentes y de la bibliografía.
ARR-310	Las propagaciones realizadas con el SGP4 serán validadas con el software STK.
5	Requerimientos de DISEÑO
ARR-400	ARxCODE tendrá un diseño modular.
ARR-410	ARxCODE se desarrollará como una librería.
ARR-420	ARxCODE contará con una interfaz gráfica.
6	Requerimientos de IMPLEMENTACIÓN
ARR-500	ARxCODE será implementado en python 2.7.
ARR-510	ARxCODE será implementado en el entorno de desarrollo Eclipse.
ARR-520	El control de versiones se realizará con Git.
7	Requerimientos de REUSABILIDAD
ARR-600	ARxCODE utilizará la librería de SGP4 en Python.
ARR-610	ARxCODE utilizará la librería de Element Tree para el parseo del CDM.
ARR-620	ARxCODE utilizará la librería de requests de python para la conexión con Space-Track.
ARR-630	ARxCODE utilizará la librería de numpy y scipy de python para los cálculos estadísticos y de integración.

**Tabla 4.1:** Tabla de especificación de requerimientos del ARxCODE

## 4.3. Interfaces

ARxCODE fue pensado para ser un sistema anexo a las estructuras ya existentes dentro del departamento de Dinámica Orbital.

El diseño completo, contempla un acceso directo al servidor de la base de datos de los productos de Dinámica Orbital para la obtención de: las efemérides propagadas de la misión operativa, y los



**Figura 4.1:** Diagrama de Interfaces del Sistema

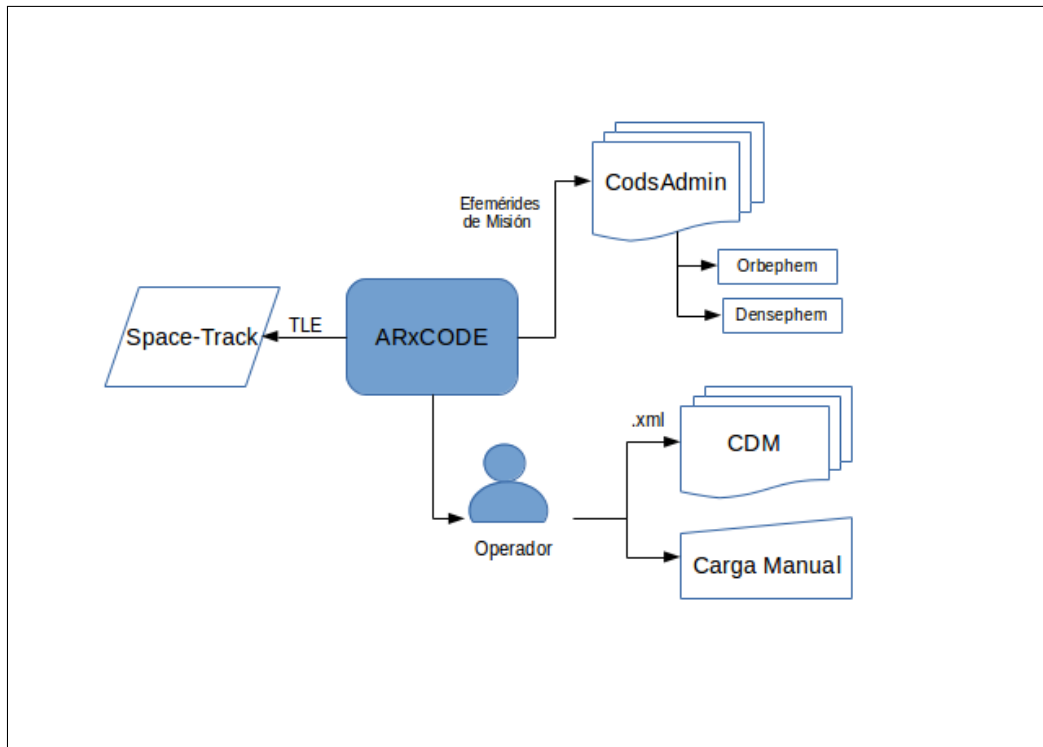
mensajes de alerta (CDM). Estos últimos también podrán ser recibidos por mail de los organismos internacionales de alerta, como por ejemplo JSpOC o mediante una solicitud a la página Space-track, previa notificación y registro autorizado del operador a cargo. (Ver Fig. 4.1)

No obstante, por cuestiones de tiempo y de accesibilidad, para el desarrollo de este trabajo, los datos que provee el departamento de Dinámica Orbital fueron descargados y se extraen de un directorio, al igual que los mensajes de alerta CDM, que fueron descargados de páginas de internet, ya que no nos han facilitado ninguno vinculado a la misión operativa con la que trabajamos, por motivos de confidencialidad.

Se realizó la automatización de la descarga de TLEs de la página Space-Track y se habilitó en la interfaz la pantalla que permite la carga manual de los datos del encuentro.

En conclusión, las interfaces implementadas, son:  
(Ver Fig. 4.2)

- Conexión a Space-Track para la solicitud de TLEs.
- Administración de las efemérides orbitales de los directorios de CodsAdmin.
- Administración de los CDM del directorio CDM, a través de la intervención del operador.
- Carga Manual de datos de un encuentro realizada por el operador.



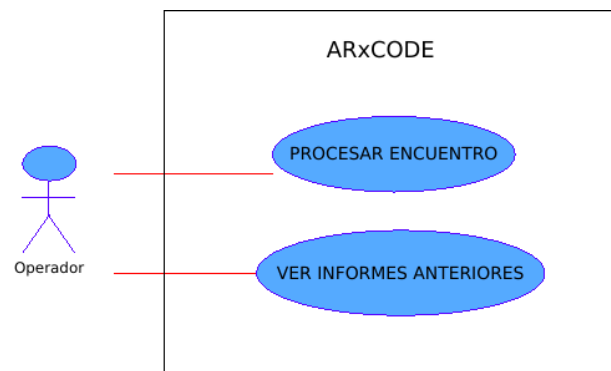
**Figura 4.2:** Diagrama de Interfaces Implementadas en ARxCODE

## 4.4. Casos de Uso

Este trabajo se pensó como un sistema acoplado al software principal del departamento de Dinámica Orbital. En este sentido, no existe gran complejidad en la estructura del prototipo, ya que su valor, radica en la correcta implementación de los algoritmos que procesan la información del encuentro. Identificamos dos casos de uso:

Fig. 4.3

- *Procesar Encuentro*: que nuclea el procesamiento vertebral de ARxCODE
- *Ver informes de encuentros anteriores*: ofrece encuentros anteriores.



**Figura 4.3:** Casos de Uso de ARxCODE

Nombre	Procesar Encuentro
Actor	Operador de Dinámica Orbital con Autorización
Propósito	Calcular la probabilidad de colisión, la mínima distancia total y mínima distancia en la coordenada radial, para poder hacer un análisis de la situación de encuentro.
Resumen	Procesa la ingesta de datos de un encuentro, (CDMs o ingreso manual) y calcula los parámetros de la situación de riesgo: mínima distancia total, mínima distancia en la coordenada radial y probabilidad de colisión. Realiza gráficos e informes.
Precondiciones	El operador debe estar registrado en la página space-track de NORAD. Los archivos CDM deben estar previamente cargados en el Directorio de búsqueda. El operador debe conocer el encuentro que desea analizar y sus datos en caso del ingreso manual.
Flujo Principal	1 - El operador selecciona un archivo CDM 2 - El operador oprime el botón <i>Track</i> para visualizar el encuentro proyectado en la superficie terrestre (opcional) 3 - El operador oprime el botón para generar un informe (opcional)
Flujo Alternativo	1 - El operador ingresa los números de identificación de los objetos (NORAD_ID) 2 - El operador ingresa la fecha y hora del máximo acercamiento (TCA) 3 - El operador oprime el botón <i>Procesar</i> para procesar el encuentro
Postcondiciones	El informe de análisis de riesgo fue generado y almacenado.

**Tabla 4.2:** Tabla con la descripción del caso de uso: *Procesar Encuentro*

## 4.5. Arquitectura

### Componentes

En un planteo conceptual, con alto grado de abstracción, los distintos paquetes de ARxCODE pueden agruparse en cinco componentes Fig. 4.4: PROCESAMIENTO, ADMINISTRACIÓN DE DATOS, INTERFAZ GRÁFICA Y VISUALIZACIÓN, Sistemas de Referencia y VALIDACIONES.

- **PROCESAMIENTO:** Involucra los cuatro paquetes que, no sólo operan con los datos ingresados, sino que también los manipulan y procesan para generar nuevos productos. Estos módulos son, de alguna manera, los distintos núcleos del código.

- *AjustarTle*
- *Comparar*
- *Estadística*
- *Encuentro*

- **ADMINISTRACIÓN DE DATOS:** Son aquellos paquetes que se encargan de la obtención, el desglose y el preprocesamiento de los datos que serán utilizados por el resto de los módulos.

- *TleAdmin*

- *CodsAdmin*
  - *CDM*
- **INTERFAZ Y VISUALIZACIÓN:** Agrupa el paquete que genera la interfaz gráfica y el paquete que contiene todos los módulos que generan representaciones visuales, como los ploteos o los tracks de las trayectorias de los objetos.
    - *Aplicacion*
    - *visual*
  - **Sistemas de Referencia:** *SistReferencia*, es el paquete que contiene todo lo referente a las transformaciones entre los distintos sistemas de referencia, ya sean espaciales o de tiempo.
  - **VALIDACIONES:** Agrupa todos los módulos desarrollados para validar los resultados.

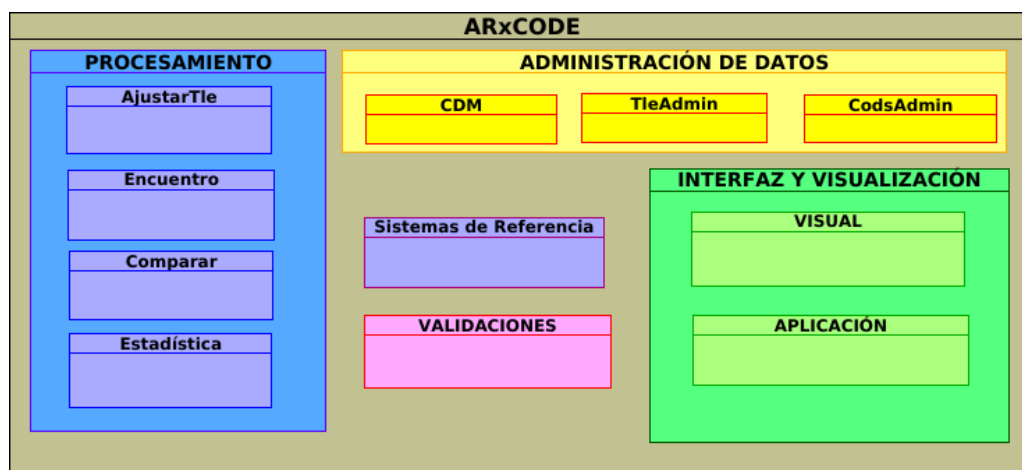


Figura 4.4: Componentes de ARxCODE

### ADMINISTRACIÓN DE DATOS: TleAdmin

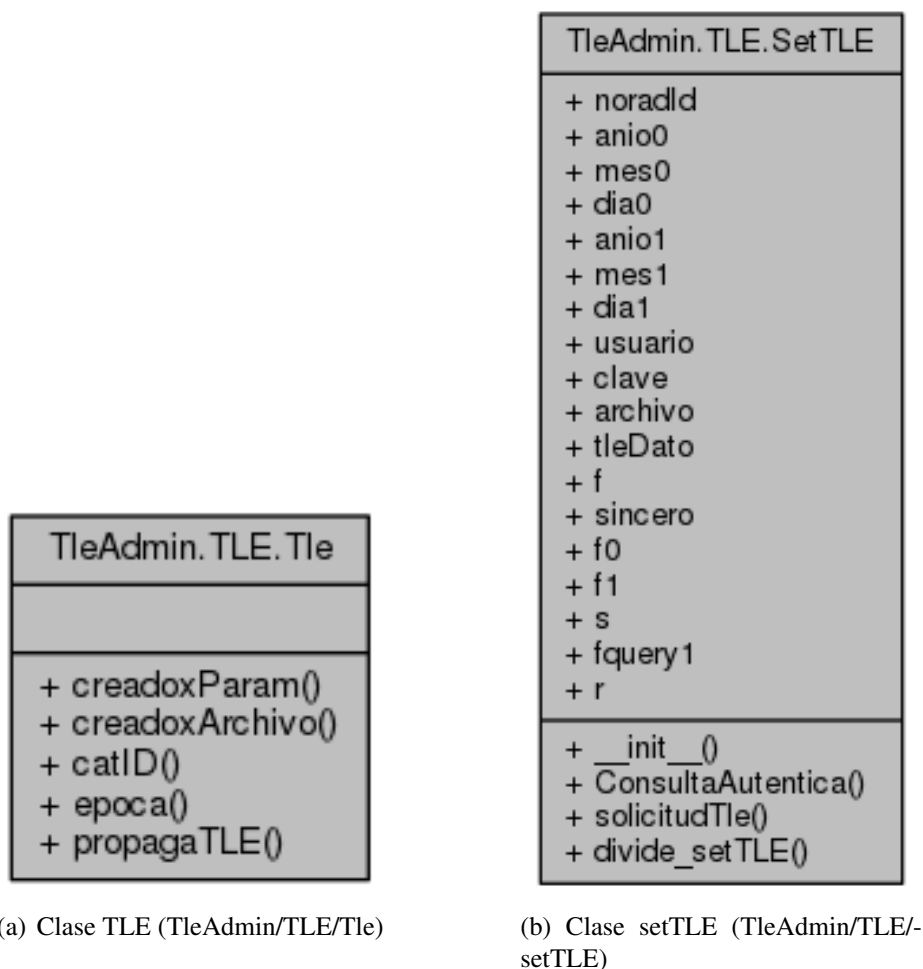
Este paquete contiene las dos clases que gestionan la descarga de los TLEs de la página Space-Track: **Tle** y **setTLE** (Fig. 5.1). La primera provee un único TLE y todo lo referente a él; se instancia a partir del identificador de NORAD del objeto y una época, o a partir del nombre de un archivo que contiene un único TLE. Entre sus métodos, es fundamental **propagaTLE()**, que propaga la posición del objeto al momento que sea necesario.

La clase **setTLE**, es necesaria particularmente para la implementación del método de Osweiler que requiere un conjunto de TLEs de 15 días para la generación de la matriz de covarianza de la posición del objeto. Esta clase se instancia, indicando el identificador de NORAD del objeto, la fecha de inicio y fin, del set que se requiere. Una vez descargados, genera un único archivo con todos los TLEs del intervalo y los guarda en la carpeta *crudosTLE*.

El método **divide\_setTLE()** de la clase **setTLE**, particiona el texto con el conjunto de TLEs y genera

un archivo por cada TLE y lo almacena en la carpeta *tle* del paquete.

Esta última carpeta, se actualiza con cada corrida del software, de modo que siempre contiene sólo el conjunto de archivos de TLEs que van a ser procesados.



**Figura 4.5:** Clases Tle y setTLE del paquete TleAdmin

## ADMINISTRACIÓN DE DATOS: CDM

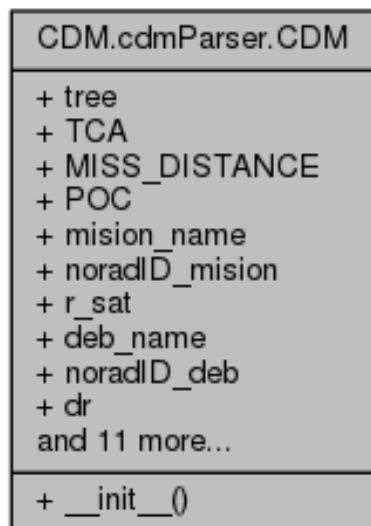
El paquete CDM contiene una carpeta con archivos en formato del CDM, en xml y la clase **CDM** que tiene la capacidad de desglosarlos y extraer los datos del mensajes que serán plasmados en la pantalla de la interfaz gráfica, para la visualización del operador.

## ADMINISTRACIÓN DE DATOS: CodsAdmin

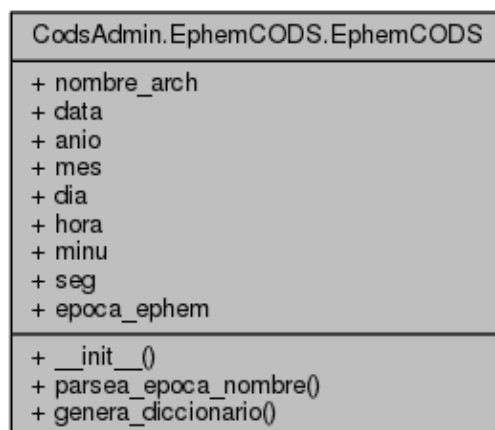
Este paquete administra los productos orbitales generados por el departamento de Dinámica Orbital CONAE Orbyt Dynamics Services (CODS).



Cuenta con varias carpetas que almacenan los productos previamente descargados y contiene a la clase **EphemCODS**, que tiene la capacidad de extraer las efemérides de los archivos y de identificar el periodo de datos que abarca el archivo a partir del nombre.



(a) Clase CDM (CDM/CDM).



(b) Clase EphemCODS (CodsAdmin/EphemCODS)

**Figura 4.6:** Clases CDM y EphemCODS para el pareseo de los mensajes de alerta CDM y los productos orbitales de CODS

### PROCESAMIENTO: AjustarTle

Este paquete incluye el módulo con el mismo nombre *AjustarTle*, que cuenta con varias funciones que reagrupan la información del set de TLEs a fin de poder hacer ordenamientos y comparaciones, entre TLEs de distintas fechas que son propagados a una misma época (práctica necesaria para la implementación del método de Osweiler para la construcción de las matrices de covarianza).

### PROCESAMIENTO: Comparar

En el paquete *Comparar* se nuclean todos los módulos y funciones que permiten la selección y la extracción de los datos de los productos de Dinámica Orbital (CODS), y sus respectivas comparaciones con los resultados que provienen de la propagación de los TLEs. Este tipo de comparaciones son necesarias en la estimación de errores que se comenten al utilizar propagaciones de TLE con SGP4.

### PROCESAMIENTO: Estadística

Dentro de este paquete se encuentran los desarrollos referidos a los cálculos estadísticos, más precisamente los módulos que calculan las matrices de covarianza. En este paquete se encuentra el módulo que implementa el método de Osweiler **matrizOsweiler**.

### PROCESAMIENTO: Encuentro

Este es el paquete núcleo del software. En él se encuentra la clase **Encuentro** Fig. 4.7, que instancia la generación del encuentro, incorporando ambos objetos mediante sus identificadores de NORAD y el TCA, generando las propagaciones necesarias, y las matrices de error, para calcular la mínima distancia y la probabilidad de colisión. A tal fin, cuenta con los métodos (Fig. 4.7): **calculaMacombinada**, **proyecta\_alplano\_encuentro**, **calculaPoC\_circ** y **calculaPoC\_gral**

agregar clase posicion



**Figura 4.7:** Clase Encuentro para el cálculo de los parámetros del acercamiento

### INTERFAZ GRÁFICA Y VISUALIZACIÓN: Aplicación

Este paquete contiene, principalmente el módulo con el formulario de interfaz de ARxCODE **frm\_main**. Dentro del mismo se ubican las clases que heredan de la estructura de QT, para el desarrollo de la aplicación, y son estas clases las que invocan los distintos módulos del resto del código para el desarrollo de los procesos.

### INTERFAZ GRÁFICA Y VISUALIZACIÓN: visual

**Visual** es el paquete que agrupa todos los módulos de generación de gráficos y ploteos. Los gráficos se utilizaron principalmente para el estudio de la tendencia de errores de los TLE y otros análisis y validaciones.

Dentro de este paquete se encuentra el módulo que genera el track de las órbitas, proyectadas sobre el mapa en el momento del encuentro.

## Sistemas de Referencia

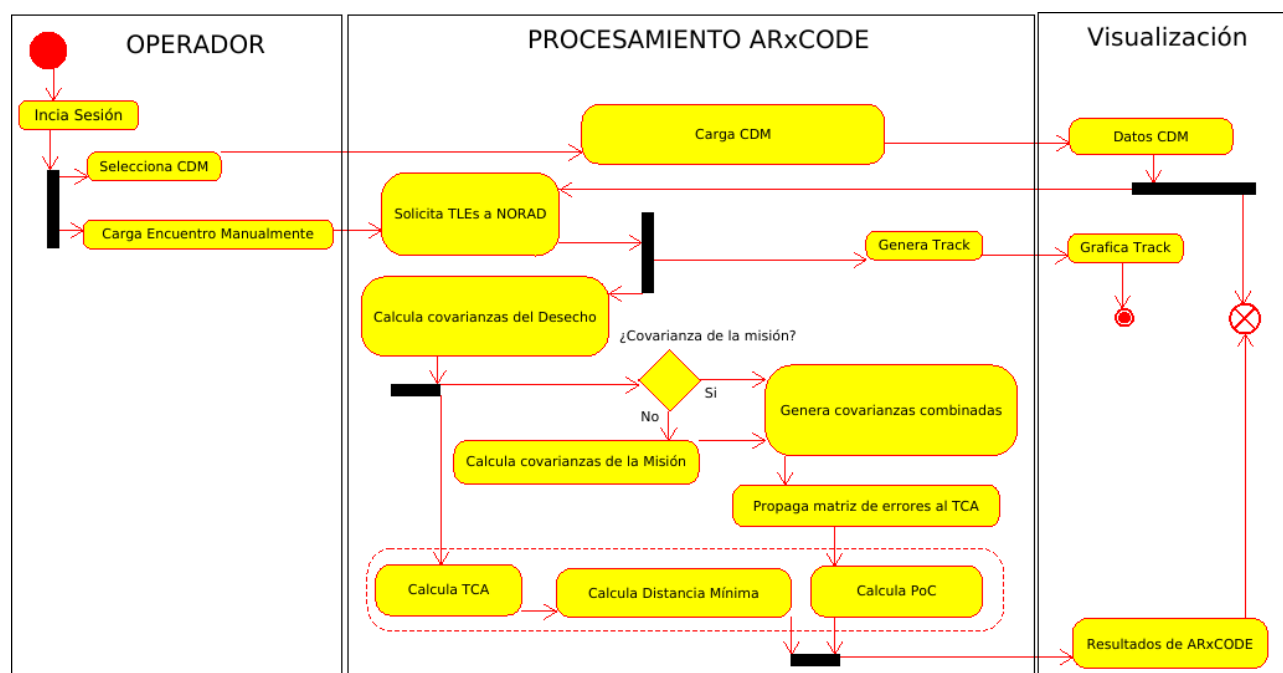
Este paquete contiene módulos para realizar transformaciones entre los distintos sistemas de referencia. Entre ellos, los dos más utilizados son: *teme2tod* y *ricSis*, ya descritos en [referencia sist de ref. marco teorico](#).

## Validaciones

Reúne todas los módulos que se desarrollaron para la validación de los resultados, cuyos valores se analizan y publican en la sección de Resultados y Validaciones Sec. 5. A saber:

- valida\_OSW: valida el método de Osweiler.
- valida\_poc: valida los métodos de cálculo de la probabilidad de colisión.
- valida\_RTN: valida la transformación del sistema de referencia al RTN.

## 4.6. Diagrama de Actividad



**Figura 4.8:** Diagrama de Actividades de ARxCODE

# Validación y Resultados

## 5.1. Introducción

En este capítulo presentamos los distintos escenarios que fueron planteados para la validación de los procesos.

Dado que para la metodología de estimación de errores que proponemos utilizamos datos reales de una misión operativa argentina, hubiera sido deseable contar con datos de alertas de colisiones reales propias de esa misión, ya que esto nos hubiera permitido hacer una validación end-to-end de todo el prototipo. No obstante, por cuestiones de confidencialidad y políticas que fueron modificándose, no fue posible tener acceso a esa información, que según nos comunicaron, fue borrada una vez finalizada la misión.

Frente a este panorama, presentamos a continuación la secuencia de etapas de validación que permiten evaluar, cada una de las etapas del procesamiento.

En primer lugar fue fundamental corroborar las propagaciones de los TLEs realizadas con la librería de python *sgp4-1* (Brandon Rhodes), para ello utilizamos la versión de prueba que ofrece el software STK (System Tool Kit) (Analytical Graphics, Inc.).

Para la validación de los resultados de la implementación del método de Osweiler en la generación de matrices de covarianza, comparamos nuestros resultados para los distintos escenarios que se publican en el trabajo.

El método que proponemos para la estimación de la propagación de errores, es el que más dificultades presentó para ser validado. Ya que al basarse plenamente en los datos de la misión cuyos resultados de colisión de alerta no nos fueron suministrados, fue analizado en comparación con resultados estadísticos globales, o sobre el estudio de encuentros de otras misiones y esto implica una variación en sí mismo.

Finalmente la implementación del cálculo de probabilidad de colisión fue evaluado a partir de la recopilación de bibliografía con datos de encuentros anteriores.

## 5.2. Implimentación del modelo SGP4 en Python

Para la propagación de las posiciones orbitales con el modelo SGP4 (Sec. 2.3.1) utilizamos la librería de python **sgp4-1** (Brandon Rhodes). Luego usamos el software *Systems Tool Kit (STK)* (Analytical Graphics, Inc.) para comparar nuestras propagaciones y asegurarnos la correcta utilización y configuración de la librería sgp4-1.

Se listan a continuación dos tablas con las efemérides de la misión, correspondientes a los primeros cuatro minutos del día 01/01/2013. Ambas fueron generadas a partir del mismo TLE y presentan resultados que difieren en algunos metros para los peores casos. Resultado aceptable, teniendo en cuenta que las estimaciones groseras de errores para las propagaciones hechas con TLEs y SGP4 acarrear errores de kilómetros o decenas de kilómetros.

### TLE.

```
1 xxxxU xxxxx 13001.74853505 .00000428 00000-0 75550-4 0 9996
2 xxxxx 098.0122 011.5654 0001526 107.5603 009.0604 14.72289948 84036
```

Epoca	x [km]	y [km]	z [km]	vx [km/s]	vy [km/s]	vz [km/s]
2013-01-01 00:00	-2372.76245	-1381.01830	6465.57494	-6.95099	-0.93631	-2.74523
2013-01-01 00:01	-2784.64672	-1434.31269	6287.6158	-6.77374	-0.83955	-3.18470
2013-01-01 00:02	-3185.05363	-1481.69530	6083.67196	-6.56854	-0.73932	-3.61109
2013-01-01 00:03	-3572.3305	-1522.96975	5854.58154	-6.336229	-0.63602	-4.02263
2013-01-01 00:04	-3944.8780	-1557.96472	5601.28702	-6.077737	-0.53007	-4.417616

**Tabla 5.1:** Resultados que genera ARxCODE utilizando la librería sgp4 de python para la propagación.

Época	x [km]	y [km]	z [km]	vx [km/s]	vy [km/s]	vz [km/s]
2013-01-01 00:00	-2372.76302	-1381.02018	6465.57433	-6.95099	-0.93631	-2.74523
2013-01-01 00:01	-2784.64726	-1434.31473	6287.61518	-6.77374	-0.83955	-3.18470
2013-01-01 00:02	-3185.05413	-1481.69750	6083.67116	-6.56854	-0.73932	-3.61109
2013-01-01 00:03	-3572.33097	-1522.97210	5854.58064	-6.33622	-0.63602	-4.02263
2013-01-01 00:04	-3944.87849	-1557.96721	5601.28604	-6.07773	-0.53008	-4.41761

**Tabla 5.2:** Resultados del Systems Tool Kit (STK) propagando el mismo TLE que ARxCODE.

hacer las diferencias en python y publicarlas

## 5.3. Estudio de errores de TLE con datos históricos

El trabajo de Osweiler publica los resultados de las matrices de covarianza generadas, para 6 misiones y 8 ventanas de tiempo.

Para la validación se tomaron dos escenarios muy diferentes en cuanto a la altura del satélite: LAGEOS-1 a más de 5000km y ICESAT a 600km Se presentan a continuación las tablas con los resultados comparativos, entre los valores publicados y los valores obtenidos por ARxCODE.

Puede apreciarse, que los errores son muy grandes para el ICESAT, de baja altura, que se ve más perturbado por

Nombre	ID NORAD	Altura	Ecc.	Inclinación	B*
LAGEOS-1	8820	5850	0,004	109,8	0,0001
ICESAT	27642	600	0,0002 – 0,001	94	varía

**Tabla 5.3:** Resumen de las características de los satélites a analizar

el efecto atmosférico, que no es modelable con precisión; mientras que el LAGEOS-1 presenta errores muchos órdenes de magnitud menor.

## Tablas comparativas ICESAT

Vent 1	$R_v$ (km)	$R_n$ (km)	$R_c$ (km)
$R_v$	2667.377375	27.248658	-8.22221222
$R_n$	27.248658	0.34323269	-0.12314379
$R_c$	-8.22221222	-0.12314379	0.07316443

**Tabla 5.4:** Matriz de Covarianza de la Bibliografía (Osweiler, 2006) - Satélite ICESAT en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03

Vent 1	$R_v$ (km)	$R_n$ (km)	$R_c$ (km)
$R_v$	2667.37364259	27.2488814	-8.22232626
$R_n$	27.2488814	0.3432413	-0.12314867
$R_c$	-8.22232626	-0.12314867	0.073167

**Tabla 5.5:** Matriz de Covarianza que produce ARxCODE - Satélite ICESAT en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03

Vent 1	Dif. $R_v$ (km)	Dif. $R_n$ (km)	Dif. $R_c$ (km)
Dif. $R_v$	-0.00373241	0.0002234	-0.00011404
Dif. $R_n$	0.0002234	0.000008	-0.000004
Dif. $R_c$	-0.00011404	-0.000004	0.000002

**Tabla 5.6:** Diferencias de los valores calculados por ARxCODE respecto a los valores publicados en el trabajo de Osweiler (?)

## Tablas comparativas LAGEOS-1

Vent 1	$R_v$ (km)	$R_n$ (km)	$R_c$ (km)
$R_v$	0.378619	-0.0343598	0.02771527
$R_n$	-0.0343598	0.004002	-0.0027171
$R_c$	0.02771527	-0.0027171	0.0084302

**Tabla 5.7:** Matriz de Covarianza de la Bibliografía (Osweiler, 2006) - Satélite LAGEOS-1 en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03

Vent 1	$R_v$ (km)	$R_n$ (km)	$R_c$ (km)
$R_v$	0.37863904	-0.03440871	0.02772177
$R_n$	-0.03440871	0.00401173	-0.00272334
$R_c$	0.02772177	-0.00272334	0.00843443

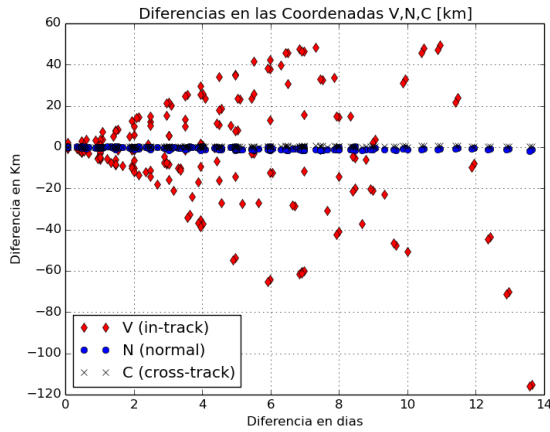
**Tabla 5.8:** Matriz de Covarianza que produce ARxCODE - Satélite LAGEOS-1 en la ventana temporal del 1-Mar-03 al 16-Mar-03

## Diferencias de los escenarios todos contra todos

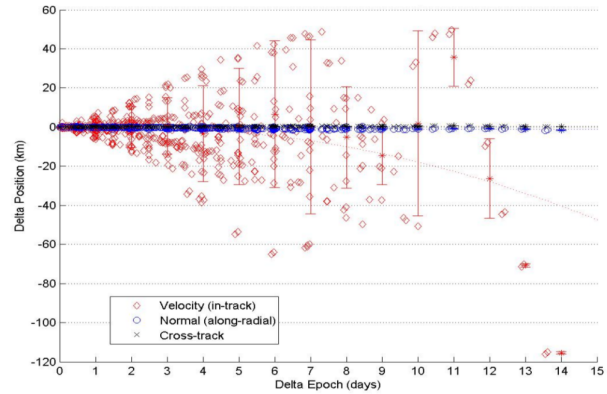
Estudio hecho sobre los errores que se producen en las propagaciones de los TLE en función de la cantidad de días que se propaguen.

Vent 1	Dif. $R_v$ (km)	Dif. $R_n$ (km)	Dif. $R_c$ (km)
Dif. $R_v$	0.000020	-0.000048	0.000006
Dif. $R_n$	-0.000048	0.000009	-0.000006
Dif. $R_c$	0.000006	-0.000006	0.000004

**Tabla 5.9:** Diferencias de los valores calculados por ARxCODE respecto a los valores publicados en el trabajo de Osweiler (?)

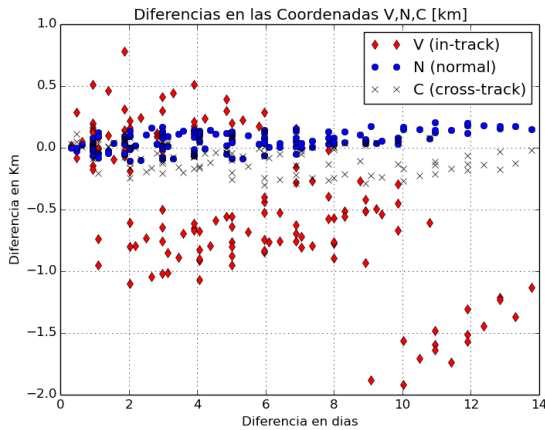


(a) Diferencias ICESAT - ARxCODE

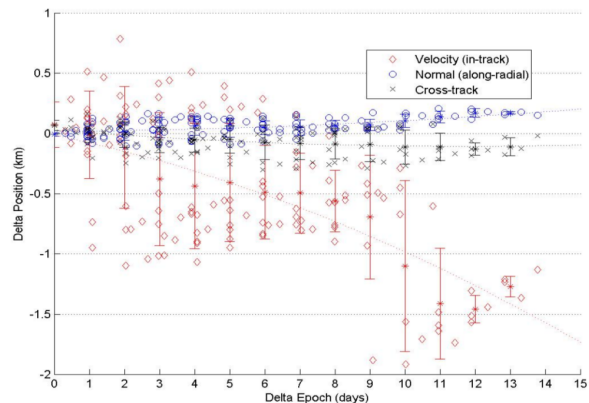


(b) Diferencias ICESAT - Osweiler

**Figura 5.1:** Gráfico con Diferencias Totales del escenario ICESAT



(a) Diferencias LAGEOS-1 - ARxCODE



(b) Diferencias LAGEOS-1 - ARxCODE

**Figura 5.2:** Gráfico con Diferencias Totales del escenario LAGEOS-1

## 5.4. Estudio de errores de TLE contra efemérides precisas

### Sistema de referencia TOD

Como ya mencionamos **debe haber una sección dedicada a datos CODS**, los productos del departamento de dinámica orbital con los que trabajamos ofrecen las posiciones orbitales en el sistema de referencia verdadero

de la fecha True of Date (TOD), mientras que los resultados de las propagaciones con el sgp4 se encuentran en el sistema TEME. Para poder hacer comparaciones desarrollamos un módulo que transforma las coordenadas y velocidades, del sistema TEME al sistema TOD. (Ver. [apendice](#)). Para la validación del mismo, utilizamos TLEs de la misión y los propagamos con el sgp4. Los resultados que obtuvimos (en el sistema TEME), los transformamos al sistema TOD con el módulo de transformación desarrollado y luego lo comparamos con los productos de dinámica orbital, para los mismos instantes.

buscar esos resultados

### Estadística de Errores

Con la certeza de que los datos eran compatibles y podían ser comparados, iniciamos el procesamiento de comparación de las posiciones y la generación de los resultados estadísticos para la propagación de errores que describimos en la Sec. ??.

En un pre-procesamiento sobre un periodo amplio de la misión, constatamos que fuera de los intervalos de maniobras por commissioning o maniobras de rutina, los TLE presentan un error que es *acotado, estable y/o* modelable.

#### Tendencia Anual 01/01/2013 - 30/08/2013



**Figura 5.3:** Tendencia anual de las diferencias contra los datos de dinámica orbital en coordenadas cartesianas del Sistema TOD



# Capítulo 6

## Conclusiones

# Apéndice

## 7.1. Appendix 1

## 7.2. Transformación de Coordenadas

[Montenbruck, Vallado Revisitin, Vallado Coorde Sys, tabla de Boado]

Para la comparación de las posiciones en coordenadas cartesianas, es necesario llevar ambos vectores a un mismo sistema de referencia. La figura (ref) muestra un resumen de los distintos sistemas y las consideraciones de cada uno.

FRAME DESCRIPTORS OF THE CLASSICAL TRANSFORMATION OF DATE			
Abbrev.	Common Names	Other Designators*	Rotation
<b>TEF</b>	(True) Earth fixed, body fixed	Earth Centered Rotating (ECR)	↔ [W]
<b>PEF</b>	Pseudo Earth fixed, Pseudo body fixed	Earth Fixed Greenwich (EFG) Earth Centered Earth Fixed (ECEF)	↗ ↔ [R]
<b>UOD</b>	Uniform (Equinox) of Date	Earth Centered Inertial (ECI) True Equator and Mean Equinox	↗ ↔ [Q]
<b>TOD</b>	True (Equinox) of Date, True Equator and True Equinox		↗ ↔ [N]
<b>MOD</b>	Mean (Equinox) of Date, Mean Equator and Mean Equinox		↗ ↔ [P]
<b>J2000</b>	Mean of 2000		↗ ↔ [Eq.1] <sup>T</sup>
<b>GCRF</b>	Geocentric Celestial Reference Frame		↗

\* AFSPC Operating Instruction 60-102 11-Mar-1996, TP SCC 008

En nuestro caso en particular, los datos que provee CODS se publican en el sistema TOD: True of Date (Verdadero de la época), mientras que los vectores de estado que genera el propagador SGP4 están calculados en el sistema TEME: True Equator Mean Equinox (Ecuador Verdadero y Equinoccio Medio), también denominado UOD (Uniform Equinox of Date).

Para la transformación de los datos de salida del SGP4 en el sistema TEME, al sistema TOD utilizamos la ecuación de los equinoccios,  $E_{Equinox}$ , que nos permite transformar el equinoccio medio en el equinoccio

verdadero.

Dado el vector de estado en el sistema TEME,  $r_{TEME}$ , lo multiplicamos por la matriz de transformación en el eje  $z$   $Rot_3(EQ_{equinox})$  y obtenemos el vector de estado en el sistema TOD,  $r_{TOD}$ .

$$r_{TOD} = [Q]r_{TEME} \quad (7.1)$$

$$Q = \begin{pmatrix} \cos(-EQ_{eqe}) & \sin(-EQ_{eqe}) & 0 \\ -\sin(-EQ_{eqe}) & \cos(-EQ_{eqe}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La ecuación de los equinoccios utiliza el modelo de nutación IAU-80 que considera los parámetros de nutación y los 106 coeficientes de Delaunay para el cálculo de la longitud  $\Delta\Psi$  y la oblicuidad  $\Delta\epsilon$ .

$$EQ_{eqe} = \Delta\Psi \cos(\epsilon) + 0,00264'' \sin(\Omega_{\zeta}) + 0,000063'' \sin(2\Omega_{\zeta}) \quad (7.2)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \bar{\epsilon} + \Delta\epsilon \\ \Delta\Psi &= (A_p + A_{pl}tt) \sin(a_{p_i}) \\ \Delta\epsilon &= (A_e + A_{el}tt) \cos(a_{p_i}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} tt &= (jd - 51544,5)/36525,0 \\ \bar{\epsilon} &= 84381,448'' - 46,8150''tt - 0,00059''tt^2 + 0,001813tt^3 \\ a_{p_i} &= a_{n1}M_{\zeta} + a_{n2}M_o + a_{n3}\mu_{\zeta} + a_{n4}D_o + a_{n5}\Omega_{\zeta} \end{aligned}$$

Los coeficientes:  $A_p, A_{pl}, A_e, A_{el}, A_{n_i}$  se extraen de la tabla de coeficientes de nutación de Seidelman(citar).

Y el resto de los parámetros se calcula según las expresiones:

$$\begin{aligned} M_{\zeta} &= M(tt) \\ M_o &= M(tt) \\ \mu_{\zeta} &= \mu(tt) \\ D_o &= D(tt) \\ \Omega_{\zeta} &= \Omega(tt) \end{aligned}$$

## 7.3. Appendix 2

# Bibliografía

- Akella, M. R. and Alfriend, K. T. (2000). Probability of Collision Between Space Objects. *Journal of Guidance Control Dynamics*, 23:769–772.
- Analytical Graphics, Inc. System tool kit - stk 11x64.
- Babiker, F., Doyon, M., and Abbasi, V. (2012). The canadian space agency (csa) collision risk assessment and mitigation system (crams): Sharing the development and the operational challenges. In *SpaceOps Conference*.
- Brandon Rhodes. sgp4-1.4.
- Consultative Committee for Space Data Systems, C. (2013). Conjunction data message standard. Technical report, CCSDS.
- ESA (2013). Space Debris. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/Space\\_Debris](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Debris).
- Hoots, F. R. and Roehrich, R. L. (1980a). Models for propagation of norad element sets. Technical report, AEROSPACE DEFENSE COMMAND PETERSON AFB CO OFFICE OF ASTRODYNAMICS.
- Hoots, F. R. and Roehrich, R. L. (1980b). Spacetrack report no. 3 models for propagation of norad element sets. Technical report, Project Spacetrack Reports, Office of Astrodynamics, Aerospace Defense Center.
- Hoots, F. R. and Roehrich, R. L. (1998). A History of Analytical Orbit Modeling in the United States Space Surveillance System. Third US-Russian Space Surveillance Workshop. Washington, D.C.
- IADC (2007). *Space Debris Mitigation Guidelines*. IADC.
- J.R. Alarcón Rodríguez, F.M. Martínez-Fadrique, H. K. (2004). Development of a collision risk assessment tool. *Advances in Space Research*, 34:1120–1124.
- Karacalioglu, A. G. and Stupl, J. (2016). The impact of new trends in satellite launches on the orbital debris environment.
- Kessler, D. and Cour-Palais, B. (1978). Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt. *Journal of Geophysical Research*, 83:2637–2646.
- Klinkrad, H. (2006a). *Space Debris. Models and Risk Analysis*, chapter 8, pages 215–241. Springer.
- Klinkrad, H. (2006b). *Space Debris. Models and Risk Analysis*. Springer.
- Laporte, F. (2014). Jac software, dedicated to the analysis of conjunction messages. *AIAA*, 1774.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Lei, C., Xian-Zong, B., Yan-Gang, L., and Ke-Bo, L. (2017). *Orbital Data Applications for Space Objects*. Springer.
- NASA. Orbital Debris Program Office. <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/>.
- NASA (2014). Space missions and satellite box score. *Orbital Debris Quarterly News*, 18.
- NASA (2017a). The od environment in numbers. *Orbital Debris Quarterly News*, 21.
- NASA (2017b). Space missions and satellite box score. *Orbital Debris Quarterly News*, 21.
- Osweiler, V. P. (2006). Covariance estimation and autocorrelation of norad two-line element sets. Master's thesis, Air Force Institute of Technology, USA.



