

# Perspectivas de la Formación en Informática para la Industria Espacial Argentina

Carlos J. Barrientos<sup>1,2</sup>, Guido A. Alvarez<sup>1,2</sup>, Matias A. Olmedo<sup>1</sup>, and Pablo A. Ferreyra<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Comisión Nacional de Actividades Espaciales

<sup>2</sup> Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich"

<sup>3</sup> FCEFYN-FAMAF-Universidad Nacional de Córdoba

**Resumen** Los sistemas espaciales están compuestos por elementos de hardware así como por elementos de software, instanciados tanto en el segmento espacial o de vuelo (satélite), como en el segmento terrestre. Para su desarrollo requieren de un conocimiento profundo de la aplicación y del ambiente operacional. En el caso específico de los elementos de software, estos deben ajustarse a condiciones de contorno propias del área espacial. Por ejemplo, que un satélite en órbita no puede repararse remotamente o que, por una condición orbital, las ventanas de comunicación suelen ser esporádicas, de bajo ancho de banda y de reducida duración. Estas y otras condiciones de contorno implican desafíos en la implementación y operación de este tipo de productos informáticos que pueden ser resueltos usando tecnologías como los sistemas operativos de tiempo real, la computación de alta performance, las redes tolerantes a demora y el aprendizaje automático. Este trabajo resume estas condiciones de contorno y describe las acciones realizadas para promover la transferencia de conocimiento a la comunidad a través de programas de educación a distancia y formación de posgrado.

**Keywords:** Informática · Sistemas Espaciales · Educación de posgrado.

## 1. Introducción

### 1.1. Desarrollo Espacial Argentino

Argentina siempre se ha interesado en el área espacial. Las razones de este interés están asociadas a diversos factores geográficos, económicos, culturales e históricos. Por un lado, su gran extensión geográfica, sus diversos ecosistemas terrestres/costeros y los contrastes climáticos entre regiones, hacen de Argentina un país con una gran necesidad de datos espaciales. Por otro lado, la matriz socio-económica del país, con una desigual densidad poblacional y un fuerte sesgo hacia actividades económicamente extensivas como la agricultura y ganadería, requieren de datos espaciales para aumentar la eficiencia en la explotación de los recursos naturales y para hacerlo de manera sostenible.

Los primeros pasos en tecnología espacial se dieron principalmente a partir de la década de 1970, con una débil articulación gubernamental pero con un notable

espíritu emprendedor por parte de técnicos del ámbito militar y universitario [1]. Estos primeros pasos estaban orientados al logro tecnológico por sí mismo como, por ejemplo, desarrollar un satélite para uso meteorológico. Recién a partir de la creación de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) en 1991 se produjo una consolidación institucional mediante una agencia estatal civil, con presupuesto sostenido en el tiempo y con objetivos técnicos específicos.

A partir de este hito institucional, Argentina avanzó sostenidamente en el aprovechamiento de la tecnología espacial para obtener información sobre su territorio, brindar servicios de alto valor agregado y promover el desarrollo del sector productivo nacional. Se realizaron diversas misiones satelitales que produjeron un beneficio socio-económico para la sociedad y aportaron oportunidades de vinculación internacional. Ejemplo de ello son las misiones SAC-C (2000) y SAC-D (2011), desarrolladas en colaboración con la NASA [2] [3], o las misiones SAOCOM-1A (2018) y SAOCOM-1B (2020), que actualmente forman parte del sistema ítalo-argentino de gestión de emergencias SIASGE [4].

La consolidación institucional de la actividad espacial se profundizó en el año 2006 a partir de la creación de la Empresa Argentina de Soluciones Satelitales, AR-SAT, con un enfoque a la explotación de las comunicaciones. Esto permitió un significativo aumento de escala de las actividades espaciales, tanto en el sector estatal como en el privado, ya que la inversión pública ha permitido también la incubación y desarrollo de empresas afines como Satellogic, SkyLoom, Ascentio y SpaceSur, entre otras.

## 1.2. Formación de Posgrado en el Área Espacial

Al mismo ritmo de la consolidación de la actividad espacial en la Argentina, fue evidente la necesidad de contar con recursos humanos calificados. En este campo, CONAE adoptó una política de transferencia de conocimiento que empezó a implementarse en el año 1997, a través de la creación del Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", en asociación con la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) y con soporte de la Agencia Espacial Italiana (ASI). En este entorno, en el año 2009 fue creada la primera maestría de formación en el área espacial, la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial (MAIE), que a la fecha ha otorgado títulos de magíster a más de 60 profesionales de diversas áreas y disciplinas de conocimiento.

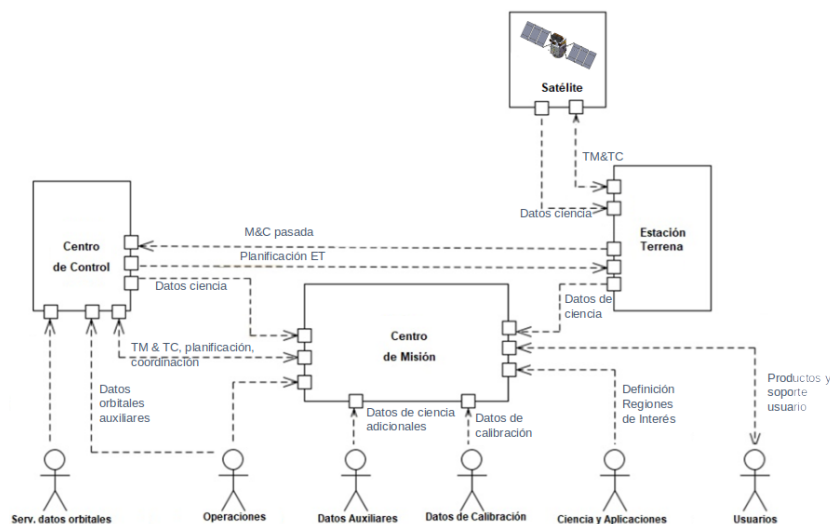
A los fines de expandir la oferta académica, en el año 2015 fue creada la Unidad de Formación Superior (UFS), en cuyo seno se implementaron tres nuevas maestrías, que a la fecha han otorgado títulos de magíster a más de 40 profesionales: la Maestría en Tecnología Satelital (MTS) y la Maestría en Instrumentos Satelitales (MIS), ambas en sociedad con la Universidad Tecnológica Nacional (UTN), y la Maestría en Desarrollos Informáticos de Aplicación Espacial (MDIAE) en sociedad con la Universidad Nacional de La Matanza (UNLaM).

Recientemente, dos nuevos programas de formación de posgrado han sido implementados en el marco institucional del Instituto Gulich. En 2019 se realizó el primer llamado del Doctorado en Geomática y Sistemas Espaciales (DGSE) y en 2023 se inició el cursado de la Maestría en Sistemas Espaciales (MSE).

## 2. Condicionantes de una Misión Satelital

### 2.1. Carácter Sistémico

Es común suponer que una misión satelital está compuesta por un único elemento en órbita (satélite) que funciona en el espacio. Sin embargo, para poder cumplir los objetivos de una misión -tales como proveer servicios satelitales para un conjunto de usuarios- es necesario considerar todo el Sistema. Esto es, la entidad constituida por diversos elementos -tanto de vuelo como de Tierra- que deben funcionar de manera coordinada e integrada. Como se observa esquemáticamente en la Fig. 1, se trata de una composición integrada de productos, procesos y personas, con el fin de satisfacer una determinada necesidad.



**Figura 1.** Representación de los elementos e interfaces de un Sistema Satelital.

La complejidad de un sistema no pasa solamente por los segmentos en vuelo o los sensores a bordo, sino también por el equipamiento y grupos humanos que realizan diferentes procesos desde Tierra, como el comando y control de la constelación satelital, la descarga de datos y su posterior procesamiento para producir servicios de alto nivel agregado.

Desde el punto de vista informático, este carácter sistémico de una misión satelital tiene un impacto en las fases iniciales del proyecto informático como la definición de requerimientos de usuario y de sistema, el análisis funcional y el diseño arquitectural. Esto implica también reconocer la existencia de una diversidad de actores institucionales en diferentes niveles de decisión, que participan de manera activa tanto en la definición, como en la realización, operación y aprovechamiento de los beneficios de un sistema de estas características. Típicamente

esto requiere que los ingenieros de sistema conozcan en profundidad la misión y dispongan herramientas de modelado y simulación adecuadas.

## 2.2. Vida Útil Indefinida

En las primeras misiones satelitales, la aplicación era prácticamente irrelevante, siendo lo importante la demostración tecnológica. Además, al ser misiones de un único satélite, la vida útil estaba acotada a la cantidad de combustible disponible, la altura de la órbita y la confiabilidad de las partes eléctricas, electrónicas y electromecánicas. Si alguna de esas limitaciones producía la pérdida del satélite, la misión quedaba trunca, sin poder prever su reemplazo.

En la actualidad, el usuario requiere la provisión regular y sostenida de servicios satelitales, sea una imagen satelital aislada o un producto de mayor valor agregado como, por ejemplo, una serie temporal de un mismo punto geográfico. El o los satélites que proveen el servicio resultan así transparentes para el usuario, quien busca solamente satisfacer una necesidad operativa en un horizonte temporal previsible. Esto lleva necesariamente a constelaciones de satélites, cuya vida útil, en principio, es ilimitada.

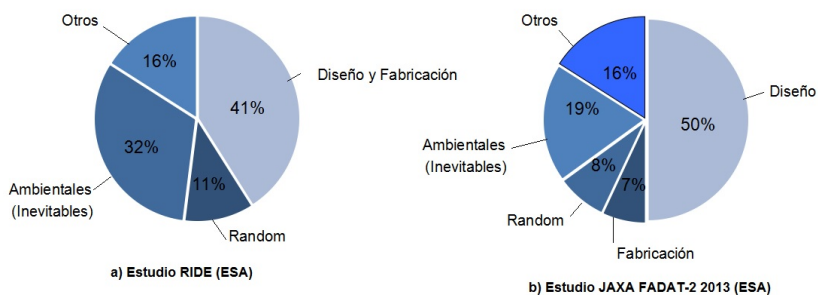
A diferencia de los satélites monolíticos, los sistemas multi-satélite tienen la ventaja de tolerar la pérdida de alguno de sus segmentos en vuelo sin que la funcionalidad total del sistema se resienta. Permiten así la sustitución por nuevos satélites evitando la obsolescencia tecnológica.

Desde el punto de vista informático, esto tiene un impacto en la estrategia de comunicaciones y toma de decisiones del sistema. Requiere incluir modelos de los equipos a bordo, algoritmos de toma de decisiones y enlaces de comunicación inter-satelitales (ISL).

## 2.3. Aplicación Crítica

Estudios recientes realizados por la Agencia Espacial Europea (ESA), muestran que aproximadamente el 50 % de las fallas (anomalías) producidas en vuelo en misiones satelitales se deben a fallas en el diseño [5], tal como ilustra la Fig. 2. Esto es, errores pre-existentes al momento de lanzar el satélite y que no pudieron detectarse en Tierra durante las pruebas funcionales y ambientales.

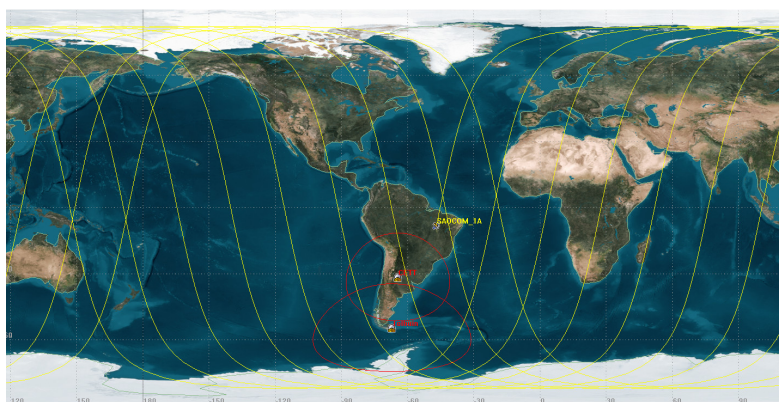
Parte de las fallas de diseño corresponde a errores o "bugs" de software. Por esta razón es que el software para uso espacial suele tener requerimientos de confiabilidad muy exigentes, en particular en aplicaciones que corren a bordo de un dispositivo de vuelo. Esto tiene un impacto en la metodología de desarrollo y en la arquitectura del software a desarrollar. El testing en Tierra es minucioso y se maximiza la representatividad de las pruebas, haciéndolas progresivamente a nivel unidad, luego subsistema y finalmente sistema. Además, se suelen utilizar sistemas operativos de tiempo real (RTOS) y automatismos de detección de fallas, diagnóstico y recuperación (FDIR).



**Figura 2.** Resultados de dos estudios donde se muestra la frecuencia de anomalías debidas a errores en diseño y otros aspectos [5].

#### 2.4. Comportamiento Autónomo

En general, los satélites deben contar con una significativa autonomía en vuelo, ya que los contactos con Tierra son limitados, reduciendo considerablemente el tiempo de comunicación efectiva entre los satélites y los operadores. La Fig. 3 ilustra este fenómeno, mostrando la traza de un satélite y el radio de cobertura de dos estaciones terrenas, lo que evidencia que gran parte del tiempo el satélite permanece desconectado de las estaciones terrenas. Este desafío es particularmente relevante para satélites de órbita baja (LEO).



**Figura 3.** Simulación orbital, se observa la trayectoria del satélite SAOCOM 1A en amarillo y el alcance de dos Estaciones Terrenas (CETT y Tolhuin) en rojo.

En consecuencia, los satélites LEO operan prácticamente de manera autónoma la mayor parte del tiempo. Las tareas a realizar deben ser programadas por los operadores con varios días de anticipación para que puedan ser "subidos." al sa-

télete los comandos correspondientes. Las tareas rutinarias de "housekeeping" se realizan de manera automática y, en caso de que aparezca una anomalía en vuelo, se usan automatismos de detección de fallas, diagnóstico y recuperación (FDIR). Esto implica para el software a bordo requerimientos que no son comunes en otras aplicaciones convencionales.

## 2.5. Comunicaciones y Memoria

Además de que los contactos con los satélites son esporádicos y de corta duración, sus características no son las mejores. Los sistemas satelitales utilizan enlaces y protocolos estandarizados tanto para la subida de telecomandos como para la descarga de telemetría y datos. Esta estandarización es necesaria para que una misma estación terrena pueda comunicarse con múltiples satélites, lo cual resulta conveniente desde un punto de vista de base instalada, pero tiene como punto débil la falta de dinamismo tecnológico.

Otra limitación relacionada es la memoria a bordo. La mayoría de las aplicaciones en vuelo generan una gran cantidad de datos. Como el producto obtenido debe almacenarse hasta que pueda ser bajado, el tamaño de la memoria, la cantidad de contactos con la estación terrena y el ancho de banda del enlace de bajada están fuertemente inter-relacionados. La memoria debe contar con la capacidad suficiente para almacenar los productos adquiridos, debe estar calificada para uso en el ambiente espacial, incluir algoritmos de gestión de overflow también disponer de interfaces de alta velocidad que permitan su conexión con dispositivos de alto throughput como son los radares SAR o las cámaras hiper-espectrales. Para resolver esta problemática, los sistemas satelitales más nuevos están incorporando enlaces inter-satelitales (ISL) que hacen más eficiente la bajada de datos. Además incorporan el procesamiento a bordo a los fines de reducir el tamaño de los datos a bajar. También se contempla la posibilidad de tener memorias colectivas en vuelo que actúen como una suerte de almacenamiento intermedio.

## 2.6. Mantenibilidad en Vuelo

Una vez que un satélite está en órbita, es imposible acceder físicamente a él para realizar algún mantenimiento del software a bordo. Por ello el mantenimiento del software debe hacerse de manera remota, considerando las limitaciones y condiciones de contorno explicadas previamente. El software debe ser diseñado para poder recibir "parches" desde Tierra, sin provocar el empeoramiento de la falla y teniendo en cuenta las limitaciones de ancho de banda.

# 3. Tecnologías y Procesos Informáticos

## 3.1. Modelado y Simulación de Sistemas

Como se explicó en la Sección 2.1, el diseño de una misión satelital requiere de un abordaje sistémico, que permita entenderla como un conjunto de partes interrelacionadas.

Para modelar un sistema espacial se utilizan herramientas informáticas tales que permitan abstraer y describir de manera estática los elementos del sistema. Para ello, se suele emplear el lenguaje SysML (System Modeling Language) [6] como estándar para modelado estático. Este es un subconjunto ampliado del estándar UML [7], que se utiliza en la industria del software. SysML recupera muchos de los diagramas y representaciones del UML, y agrega otros que son específicos al área de ingeniería de sistemas.

En SysML, el sistema se describe como un conjunto de elementos, donde cada uno representa una parte del sistema y está vinculado con otras partes, a través de diagramas, como se observa en la Fig. 1. El uso de este lenguaje permite capturar la complejidad de un sistema satelital desde un enfoque estructural y funcional, para luego poder derivar los puntos de partida del diseño del software: requerimientos, casos de uso, máquinas de estado, etc [8].

Como el modelado en SysML ofrece una visión estática del sistema, para modelar los comportamientos dinámicos se requieren implementar análisis por simulaciones, también mediante herramientas informáticas. Ejemplo de esto son los simuladores térmicos, que evalúan los cambios y distribución de la temperatura en el sistema para diferentes condiciones orbitales, como es el software Ansys Thermal Desktop [9]. Otro ejemplo son los simuladores de eventos discretos, que permiten analizar eventos de interés y sus estadísticas. Un ejemplo es la herramienta libre OMNet++ [10].

### 3.2. Redes Tolerantes a Demora

Las Redes Tolerantes a Demora y Disrupciones (DTN, por el acrónimo en inglés de Delay/Disruption Tolerant Networking) son redes de computadoras que emplean un conjunto de reglas y protocolos para transmitir información en entornos de comunicación donde las condiciones son adversas y los enlaces intermitentes. Ejemplos son las áreas remotas, entornos espaciales y redes de sensores inalámbricas. Las DTN extienden las capacidades de Internet a estos entornos al permitir la comunicación a través de enlaces intermitentes, con grandes retrasos, tasas de error altas y enlaces limitados a una dirección. Además de las redes de comunicación satelital, las redes DTN tienen muchas otras aplicaciones, como en Internet de las Cosas (IoT) [11,12], donde se utilizan dispositivos que se conectan de manera intermitente y que a su vez cuentan con recursos limitados.

El enfoque central de las redes DTN es permitir que los datos se almacenen temporalmente en nodos intermedios, por un período de tiempo hasta que se encuentre un nodo adyacente disponible para reenviar los datos. Esta arquitectura se denomina *store-carry-and-forward*, y la misma aprovecha diferentes grados de previsibilidad en los contactos futuros entre nodos para optimizar la transmisión de mensajes entre un origen y un destino [13].

### 3.3. Aprendizaje Automático

Aprendizaje automático (ML, por el acrónimo en inglés de Machine Learning) es una rama de la Inteligencia Artificial (IA) que se enfoca en el desarrollo

de algoritmos y modelos informáticos que cuenten con la habilidad de aprender a resolver tareas específicas a partir de un conjunto de datos. Gracias a la versatilidad que presenta el ML, estos algoritmos son utilizados en distintas áreas dentro de los sistemas satelitales.

En el contexto de las comunicaciones satelitales, ML se utiliza para: (a) Optimización en la asignación de recursos, analizando patrones de tráfico y condiciones de la red para asignar de manera dinámica y eficiente los recursos de ancho de banda, potencia y tiempo de transmisión entre diferentes satélites y usuarios, maximizando el rendimiento de la red; (b) Planificación de la red, prediciendo la demanda de servicios de comunicación en diferentes regiones geográficas y momentos del día; (c) Enrutamiento de redes DTN, utilizando algoritmos adaptativos que aprovechan la información sobre la disponibilidad de los nodos y las condiciones de la red para garantizar la entrega eficiente de los datos.

En el contexto de análisis de telemetría, los algoritmos de ML se emplean para el monitoreo y diagnóstico de la salud de los satélites en órbita, ya que estos pueden ayudar a identificar automáticamente patrones en los datos de telemetría para detectar posibles problemas o anomalías, lo que permite una gestión proactiva de la salud de la flota satelital y la prevención de fallos.

En el contexto de reconocimiento de imágenes, ML se utiliza para procesar y analizar las imágenes capturadas por los satélites, permitiendo la identificación automática de objetos, la clasificación de características geográficas y la generación de mapas detallados [14].

### 3.4. Computación de Alto Rendimiento

La computación de alto rendimiento (HPC, por el acrónimo en inglés de High Performance Computing) refiere a la búsqueda de soluciones informáticas tales que puedan implementar algoritmos de manera rápida y eficiente, reduciendo los tiempos de procesamiento y siendo a su vez energéticamente eficientes. En el contexto de sistemas espaciales, HPC resulta un desafío cuando se busca implementar a bordo, debido a las limitaciones propias de los satélites.

El desarrollo de soluciones informáticas de alto rendimiento suelen incluir la paralelización de tareas, que es un paradigma de programación donde el procesamiento se divide en partes, es decir, a través de procesos que son ejecutados de manera simultánea, reduciendo los tiempos del procesamiento. Un caso de ejemplo es la aplicación de HPC en el procesamiento de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) [15].

### 3.5. Sistemas Operativos de Tiempo Real

Un RTOS (Real-Time Operating System) es un sistema operativo diseñado para ejecutar las tareas en tiempos conocidos. En el contexto espacial, el uso de un RTOS es fundamental, dado que el sistema operativo debe manejar muchos periféricos con grandes limitaciones, especialmente en satélites más pequeños, como los Cubesats donde el espacio y las fuentes de energía son muy limitadas.

El uso de un RTOS en un Cubesat permite gestionar de manera eficiente las tareas críticas como las comunicaciones, el control de actitud y la recolección de datos científicos. Al proporcionar capacidades de multitarea, programación de hilos y gestión de tiempo, un RTOS permite realizar múltiples tareas de manera simultánea y coordinada, maximizando así el uso de los recursos y mejorando la eficiencia de la misión. El principal objetivo es realizar más tareas, consumir menos energía y ocupar menos memoria.

Por lo tanto, en Cubesats existe una tendencia a adoptar FreeRTOS, mientras que en satélites de mayor tamaño o que cuenten con computadora de a bordo de alta performance la tendencia es utilizar el kernel de Linux (dada su confiabilidad y popularidad), como ejemplo de esto se puede mencionar que el instrumento principal de la misión UFSAT-1 cuenta con un procesador CORTEX A9 Dual Core por lo que se implementa un linux embebido como sistema operativo.

### 3.6. Sistemas de Detección, Aislación y Recuperación

Como se explica en la sección 2.4, los satélites LEO son sistemas prácticamente autónomos ya que la mayoría del tiempo no están en comunicación con los operadores. Esto incrementa la complejidad de este tipo de dispositivos y la posibilidad de que se produzca una falla en vuelo es alta. Por lo tanto, es deseable que el satélite tenga un producto informático específico que tenga como funciones: (a) detectar la falla de manera autónoma, identificando la misma de un catálogo de fallas posibles; (b) aislar la falla de manera que no se propague a otros subsistemas; (c) tomar acciones de recuperación llevando al sistema a un estado alternativo que permita mantener al resto de los componentes del satélite en estado saludable.

Esta temática se conoce como FDIR (por el acrónimo en inglés de "Failure Detection, Isolation and Recovery"). Se trata de un área de constante estudio y evolución que involucra técnicas matemáticas, estadísticas y, recientemente, de aprendizaje automático. En CONAE, se ha acumulado experiencia en este tipo de productos informáticos y se utiliza rutinariamente en misiones satelitales [16].

### 3.7. Scheduling

Como se menciona en la sección 2.4, una de las limitaciones mas importantes de los satélites es el tiempo de comunicación con las estaciones terrenas, por lo que es necesario planificar y organizar de manera eficiente cada contacto.

Cuando se tiene una constelación de satélites, es necesario coordinar las comunicaciones y las operaciones de cada satélite de manera que se optimice el uso de los recursos disponibles. Además, al tener múltiples satélites orbitando la Tierra, es común que las ventanas de comunicación de estos se superpongan, lo que puede generar conflictos en el uso de los recursos disponibles.

La informática juega un papel crucial en la resolución de este problema, ya que permite desarrollar algoritmos de scheduling avanzados que pueden tener en cuenta múltiples factores, la disponibilidad de recursos, las prioridades de las tareas, las restricciones de tiempo, etc [17].

### 3.8. Procesamiento aplicado a la teledetección

La teledetección es una técnica de adquisición de datos remota, que utiliza elementos de vuelo (satélites) que llevan sensores a bordo. Las cámaras hiperespectrales o los sensores de radar, son algunos ejemplos de sensores en el área espacial.

La teledetección se basa en que diferentes objetos, terrenos y materiales interactúan de manera diferente ante ondas electromagnéticas (luz, ondas de radar, etc.), lo que permite identificar y caracterizar distintas superficies. Cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación o de sensado más convencionales. Entre las ventajas se pueden mencionar: (a) Cobertura global y exhaustiva de la superficie terrestre; (b) Perspectiva panorámica; (c) Observación multi-escala; (d) Información sobre regiones no visibles del espectro.

Desde el punto de vista informático, los datos adquiridos son sujetos a diferentes niveles de procesamiento, utilizando diversas técnicas en cada nivel. En particular, la Agencia Espacial Europea (ESA) propone distintos niveles de procesamiento [18], comenzando por la extracción de variables de telemetría y separación de los datos de ciencia, continuando por una descompresión de los datos crudos. Los siguientes niveles incluyen calibraciones radiométricas y correcciones geométricas de la imagen. El procesamiento continúa con procesos de resampling y conversiones a niveles de reflectancia. Finalmente las imágenes procesadas se publican en repositorios accesibles para el usuario.

## 4. Abordaje Pedagógico

### 4.1. Maestrías en Informática

Dos de las maestrías descritas en la Sección 1.2 tienen una currícula fuertemente orientada a las ciencias de la informática. Por un lado, la Maestría en Desarrollos Informáticos de Aplicación Espacial (MDIAE), que tiene como objetivo específico la formación de profesionales de informática interesados en aplicaciones espaciales. La gestión y cursado se realiza en la Universidad Nacional de la Matanza (UNLaM).

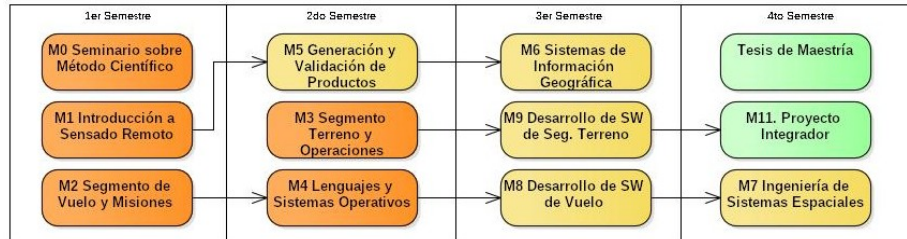
Por otro lado, la Maestría en Sistemas Espaciales (MSE), si bien tiene un grupo de materias que proveen una base introductoria general sobre sistemas espaciales, el resto profundiza en cuatro líneas de estudio electivas, una de las cuales es precisamente informática. Se cursa en el Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich", en Córdoba.

Ambas carreras fueron evaluadas satisfactoriamente por la CONEAU [19] [20] y el Ministerio de Educación de la Nación les otorgó reconocimiento oficial provisorio [21] [22].

### 4.2. Estructura Curricular

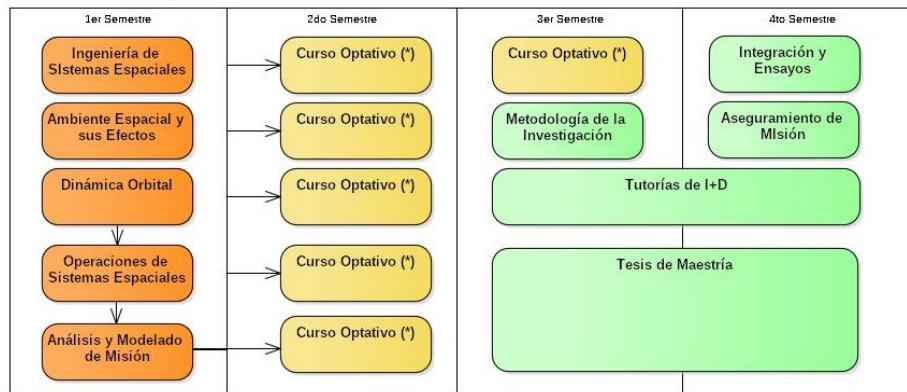
**MDIAE.** Se dicta en cuatro semestres consecutivos (2 años). Las clases son presenciales, sincrónicas y de comunicación mediada por la tecnología. Como

se observa en la Fig. 4 se dicta en cuatro semestres consecutivos, totalizando 11 asignaturas y se prevé que los estudiantes concluyan de manera completa el programa en ese plazo.



**Figura 4.** Estructura del plan de estudios de la MDIAE [19] [21].

**MSE.** En el período de dos años, a contar desde de su admisión, el maestrando debe aprobar catorce cursos establecidos en el plan de estudios (ver Fig. 5) y además presentar su tesis de maestría. Se prevé que los maestrandos concluyan de manera completa el programa en ese plazo, no aceptándose que adeuden materias o trabajos finales. Para ello, se requiere dedicación exclusiva al cursado de la misma. Los postulantes aceptados reciben una beca otorgada por la CONAE u otras instituciones.



**Figura 5.** Estructura del plan de estudios de la MSE [20] [22]. Nota (\*) materias optativas: Aprendizaje Automático, Ingeniería de Software, Sistemas Ciberfísicos, Computación Científica de Alta Performance, Procesamiento Base de Imágenes Satelitales, Sistemas de Control Inteligente, Sistemas Embebidos (entre otras).

### 4.3. Tutorías y Proyecto Integrador

Las Tutorías son parte de la formación de posgrado y pueden realizarse en instituciones cuyas actividades estén relacionadas con los objetivos del Plan Espacial Nacional y que tengan la capacidad de recibir a uno o más maestrandos.

El Proyecto Integrador es un proyecto estudiantil que generalmente consiste en el desarrollo de una misión Cubesat con el apoyo económico de CONAE. Este espacio curricular permite que el maestrando se involucre en un proyecto real de software para el área espacial, cubriendo todo el ciclo de vida, desde análisis de requerimientos hasta el testing y validación final [23].

### 4.4. Tesis de Maestría

Para acceder al título de Magíster, el maestrando debe preparar una tesis investigativa sobre algún tema específico del área espacial, cuya defensa se realiza en sesión pública. Las tesis están alineadas con los objetivos generales y específicos de CONAE. Para ello se promueve la participación de directores y codirectores tanto del ámbito universitario como de CONAE, quienes proponen a los maestrandos un tema de interés. En caso de involucrar hardware específico, se promueve el uso de los laboratorios que dispone CONAE. En todos los casos se fomenta la publicación de resultados en congresos y revistas especializadas. A la fecha, se han presentado las siguientes tesis de maestría (ordenadas según la temática):

#### *Redes Tolerantes a Demora*

- Soligo, Pablo, “Análisis y Simulación de redes DTN aplicadas a Constelaciones Satelitales” (2018).
- Vega Molinas, Blas “Verificación y Análisis Funcional de Algoritmos de Enrutamiento para Instrumentos Satelitales Distribuidos” (2023).
- Alvarez, Guido, “Modelos y Protocolos para Internet de las Cosas con Acceso Directo a Satélites” (en curso).

#### *Aprendizaje Automático*

- Montilla, Alfonso “Uso de técnicas de computer vision para la detección en vuelo de focos de calor en imágenes satelitales” (en curso).
- Zapata, Elbio "Detección de Patrones en Imágenes Satelitales utilizando Metodologías de Visión Artificial"(en curso).
- Martinez, Denis, ".Aplicación de modelos y algoritmos de aprendizaje automatizado para la detección de estados de operación en componentes espaciales críticos"(2023).
- Henn, Santiago, ".Algoritmos de Búsqueda Paramétricos para Aumento de Frecuencia y Volumen de Telemetría y Satélites"(2021).
- Montesana, Adrián, ".Optimización del Subsistema de Potencia de un Satélite Mediante la Aplicación de Técnicas Heurísticas"(2017).
- Olmedo, Matias “Machine Learning Aplicado a la Tecnología Satelital: Enrutamiento en Redes Tolerantes a Demoras con Graph Neural Networks” (en curso).

*Computación de Alto Rendimiento*

- Uranga, Javier Nicolás, "Implementación paralela en GPGPU portable del algoritmo WK para enfoque SAR"(2018) [15].

*Scheduling*

- Nadia, Pucci, "Planificador de Misión Autónomo en Tiempo Real para Satélites de Orbita Baja"(2017).
- González, Ezequiel, "Diseño de una arquitectura satelital segmentada basadas en sistemas multiagente para la gestión de emergencias"(2019) [17].

*Procesamiento*

- Estrada, Pablo, "Sistema automatizado para la co-localización de datos intersatelitales y mediciones de campo" (2017).
- Robin, José "Diseño de una Arquitectura de Software orientada al desarrollo de un Sistema Informático para el control de una antena satelital" (2019).
- Valenti, Cecilia "ARxCODE, prototipo de software para el Análisis de Riesgo por Colisión con Desechos Espaciales" (2017).
- Sufán, Eduardo "Diseño, Implementación y verificación de un procesador L1 time domain back projection para imágenes de SAR aerotransportado" (2017).

## 5. Conclusiones

La CONAE ha dedicado más de tres décadas a adquirir experiencia en la implementación de sistemas satelitales. Esto produjo conocimiento en varias áreas tecnológicas, una de las cuales es informática. En paralelo, puso en marcha un proceso de transferencia de conocimiento a otros sectores nacionales a través de programas de formación de posgrado destinado a profesionales de la informática que desean adecuar sus conocimientos al área espacial.

Este proceso requirió formar equipos de trabajo con docentes de informática de universidades nacionales a los fines de: (a) Identificar tecnologías y procesos informáticos necesarios en el área espacial; (b) Diseñar planes de carrera que provean los conocimientos mínimos necesarios; (c) Implementar, evaluar y mejorar las carreras implementadas.

La experiencia obtenida en los últimos 8 años, ha sido muy positiva, en términos de la cantidad de maestrandos formados, la receptividad del mercado laboral y la producción científica generada. No obstante, queda trabajo pendiente a realizar. Principalmente en lo referido a expandir regionalmente este tipo de programas a otras universidades con carreras en informática y reformular periódicamente los planes de estudio para que se adecúen al dinamismo de este sector tecnológico.

**Agradecimientos.** Los autores desean reconocer la participación de colegas de las universidades asociadas con la CONAE en la formulación e implementación de las maestrías mencionadas. En la UNLaM: Jorge Ierache, Betina Donadello y Alicia Mon. En la UNC: Walkiria Schulz, Julián Pucheta, Orlando Micolini y Clemar Schuler.

## Referencias

1. P. de León, *Historia de la actividad espacial en Argentina*. Lenguaje claro Editora, Oct. 2020.
2. C. Colomb, F. R. ; Alonso, “SAC-C Mission and the Morning Constellation,” in *34th COSPAR Scientific Assembly*, vol. UN-IAA-3RD-05, 2002.
3. E. Oglietti, M. ; Romero, “SAC-D Mission Automated Plan Generation and Execution Validation,” in *8th Intl. Workshop on Planning and Scheduling for Space*, 2013.
4. M. P. A. R. Battagliere, M. L.; Daraio, “COSMO-SkyMed and the ASI-CONAE cooperation: the SIASGE programme,” in *68th Intl. Astronautical Congress*, 2018.
5. J. Laine, “Analysis of Spacecraft Qualification Sequence and Environmental Testing FADAT,” División Aseguramiento de Producto, ESA-ESTEC, 2013.
6. “SysML, <https://sysml.org/>.”
7. “UML, <https://www.uml.org/>.”
8. E. Arias, “Utilización de SysML y Papyrus para el desarrollo del SW de vuelo del cubesat FS2017 haciendo uso del enfoque MBSE,” *XXIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2017.
9. “Ansys Thermal Desktop, <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-thermal-desktop>.”
10. “OMNet++, <https://omnetpp.org/>.”
11. F. Z. Benhamida, A. Bouabdellah, and Y. Challal, “Using DTN for the internet of things: Opportunities and challenges,” in *2017 8th Int. Conf. on Information and Comms Systems (ICICS)*, pp. 252–257, 2017.
12. G. Álvarez, J. A. Fraire, K. A. Hassan, S. Céspedes, and D. Pesch, “Uplink transmission policies for lora-based direct-to-satellite iot,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 72687–72701, 2022.
13. J. A. Fraire, O. De Jonckère, and S. C. Burleigh, “Routing in the space internet: A contact graph routing tutorial,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 174, p. 102884, 2021.
14. C. Scavuzzo, J. Scavuzzo, M. Campero, M. Anegagrie, A. Amor, A. Benito, and M. Periago, “Feature importance: Opening a soil-transmitted helminth machine learning model with shap,” 11 2021.
15. “Uranga j. implementación paralela en GPGPU portable del algoritmo wk para enfoque sar, <https://repositoriocy.t.unlam.edu.ar/handle/123456789/440>.”
16. “Sistema FDIR - SABIA-Mar, <https://www.argentina.gob.ar/noticias/finalizo-el-diseño-de-un-sistema-para-identificar-y-reparar-fallas-en-el-sabia-mar>.”
17. “Gonzalez, e. diseño de una arquitectura satelital segmentada basada en sistemas multiagente para la gestión de emergencias, <https://repositoriocy.t.unlam.edu.ar/handle/123456789/495>.”
18. “Niveles de procesamiento ESA, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/processing-levels>.”
19. R. M. Igarza, “CONEAU, Acta N<sup>o</sup> 599, MDIAE, UNLaM,” EX-2022-123960110-APN-DACCONEAU 2023.
20. N. R. Pan, “CONEAU, Acta N<sup>o</sup> 58, MSE, UNC,” EX-2021-104307244-APN-DACCONEAU 2022.
21. C. H. Torrendell, “Secretario de Educación de la Nación, Validez Nacional Título, MDIAE,” RESOL-2024-190-APN-SEMCH 2024.
22. J. Perzcyk, “Ministro de Educación de la Nación, Validez Nacional Título, MSE, UNC,” RESOL-2023-2669-APN-ME 2023.
23. E. Gonzalez, “Misión CubeSat FS2017: desarrollo de SW para una misión satelital universitaria,” *Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, 2017.