

## Propuesta de proyecto de investigación

### **SOUTHTRAC** *“Transport and Composition of the Southern Hemisphere Upper Troposphere and Lower Stratosphere”*

(Transporte y composición de la troposfera superior y estratosfera inferior en el hemisferio sur)

#### **Un proyecto de investigación en el campo de las ciencias atmosféricas, utilizando la aeronave alemana de investigación HALO en Argentina y Chile**

##### **1. Proyecto de investigación "SOUTHTRAC" – Introducción**

El proyecto de investigación *"Transport and Composition of the Southern Hemisphere Upper Troposphere and Lower Stratosphere (SOUTHTRAC)"* (Transporte y composición de la troposfera superior y de la estratosfera inferior en el Hemisferio Sur) tiene como objetivo investigar el papel de los procesos atmosféricos tanto dinámicos como químicos en la troposfera superior y la estratosfera inferior (UTLS), así como en la atmósfera central del hemisferio sur, mediante el uso de observaciones atmosféricas realizadas desde la Aeronave Alemana de Investigación de Gran Altitud y Largo Alcance "HALO". La aeronave de investigación HALO se basa en una aeronave de reacción tipo avión de negocios Gulfstream 550, capaz de alcanzar altitudes de vuelo de hasta 15 km. Llevará a bordo una serie de instrumentos científicos especiales ofrecidos por varios grupos de investigación alemanes. Los vuelos de investigación se centrarán en realizar mediciones en la banda de altitud situada aproximadamente entre los 7 km y los 80 km, que se llevarán a cabo en el espacio aéreo de Argentina y Chile, para cumplir con los objetivos científicos del proyecto. Se ha programado una campaña de mediciones de campo de la aeronave para el período comprendido entre los meses de septiembre y noviembre de 2019. La estrategia para los vuelos y el análisis de los datos serán aportados por diferentes modelos numéricos de la atmósfera.

En los siguientes apartados de esta propuesta se detallan los antecedentes científicos (apartado 8), proyectos anteriores relacionados con esta propuesta (apartado 10) y los métodos de medición (apartado 9) que utiliza la aeronave HALO.

Los detalles del consorcio del proyecto, la definición temporal del experimento de campo, las especificaciones de la aeronave se encuentran especificados entre los apartados 2 y 6. En el apartado 7 se ilustra la amplia área geográfica destinada a las mediciones, así como las típicas rutas de vuelo ejemplares que se requieren para poder realizar la investigación.

##### **2. Definición del marco temporal**

Por razones científicas, es imprescindible que las mediciones se tomen durante la temporada comprendida entre los meses de septiembre, octubre y noviembre. Se planifica programar dos períodos intensivos de observaciones en 2019 en América del Sur, uno al principio de la temporada y el otro al final, con una duración de 3-4 semanas cada uno. HALO volverá a su base en Alemania entre estas dos intervenciones. Para satisfacer los requisitos científicos, teniendo en cuenta al mismo tiempo las restricciones logísticas, se proponen los siguientes dos períodos intensivos de observaciones (con flexibilidad de  $\pm 1$  semana a estas alturas del proceso de planificación):

**1º período de observaciones:** de unas 4 semanas de duración, localizado en América del Sur, entre el 5 de septiembre y el 7 de octubre de 2019.

**2º período de observaciones:** de unas 3 semanas de duración, localizado en América del Sur, entre aproximadamente los días 7 y 25 de noviembre de 2019.

Las fechas indicadas pueden estar sujetas a cambios, pero aun así solo sería cuestión de unos pocos días.

En la Figura 1 que se ofrece a continuación se resume esquemáticamente el programa de HALO para SOUTHTRAC.

<b>2019</b>	Calendar week	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
	Monday Date	Jul 22	Jul 29	Aug 5	Aug 12	Aug 19	Aug 26	Sep 2	Sep 9	Sep 16	Sep 23	Sep 30	Oct 7	Oct 14	Oct 21	Oct 28	Nov 4	Nov 11	Nov 18	Nov 25	Dec 2	
	Mission	SOUTHTRAC Instrument integration EMI test flight & functional test flight							SOUTHTRAC Mission													fitting out
		Oberpfaffenhofen Germany							Phase 1 in South America including transfer flights			Oberpfaffenhofen Germany			Phase 2 in South America including transfer flights				OP			

Figura 1. Posible plan aproximado para las dos intervenciones (Fase 1 y Fase 2) de la aeronave HALO en América del Sur en 2019. A estas alturas de la planificación se aconseja tener en cuenta una flexibilidad de  $\pm 1$  semana (es decir, la Fase 1 podría comenzar una semana antes de la fecha aquí indicada).

### 3. El consorcio del proyecto

SOUTHTRAC es un proyecto nacional alemán conjunto propuesto por el Centro Helmholtz de Investigación, el Centro Aeroespacial Alemán (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*, DLR), el Centro Jülich de Investigación (*Forschungszentrum Jülich*, FZJ), el Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT) y las Universidades de Mainz, Frankfurt, Wuppertal y Heidelberg. Las universidades que participan en el proyecto cuentan con el apoyo de la Fundación Alemana para la Investigación (DFG). SOUTHTRAC se enmarca entre otros programas internacionales como son el proyecto "Procesos estratosféricos-troposféricos y su función en el clima" (SPARC) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas.

### 4. El propietario y operador de la aeronave de investigación HALO

DLR, el Centro Alemán Aeroespacial (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*) es el propietario y operador de la aeronave de investigación que se va a utilizar en este proyecto: HALO (matrícula D-ADLR) Los instrumentos que constituyen la carga útil de HALO para los proyectos SOUTHTRAC son de su propiedad y están operados por diferentes colaboradores científicos. Para información más detallada, véase el apartado 9 de este documento.

DLR es una entidad pública sin ánimo de lucro. Sus operaciones de vuelo son de naturaleza no comercial/privada y están dedicadas a la investigación.

### 5. Información acerca de la aeronave

DLR tiene en propiedad una flota de aeronaves de investigación especialmente modificadas, basadas en las instalaciones de DLR para Vuelos Experimentales localizadas en Braunschweig y Oberpfaffenhofen (Figura 2) en Alemania. DLR tiene una gran experiencia en el manejo de estas aeronaves con fines de investigación.



Figura 2. La flota de DLR en sus instalaciones de Oberpfaffenhofen



Figura 3. HALO con una configuración parecida a la planificada para el proyecto SOUTHTRAC

HALO se basa en un reactor de negocios modelo G550 fabricado por *Gulfstream Aerospace Corporation*. Ha experimentado múltiples modificaciones para poder ofrecer la infraestructura técnica necesaria para unas cargas útiles científicas muy diversas. En términos generales se elige la configuración de la carga útil en función de la finalidad de la investigación en cuestión. En la Figura 3 se ve una fotografía de la configuración exterior de la aeronave tal y como se ha planificado para el proyecto SOUTHTRAC.

A continuación, se detallan los datos técnicos de la aeronave. **Datos técnicos de HALO**

Fabricante / clase	Gulfstream G550	
Matrícula	D-ADLR	
Dimensiones	Largo 31,10 m   Alto 7,90 m   Envergadura 28,40 m	
Velocidad	Velocidad mínima 92 m/s   Velocidad máxima 258 m/s   Velocidad normal 210 m/s	
Altitud	Altitud mínima sobre el nivel del mar/tierra Techo máximo	1000 pies / 1500 pies 51000 pies

Carga útil	Peso en vacío Peso máximo de despegue Carga útil científica máxima	22120 kg 41277 kg 3000 kg
Instrumentación básica y comunicaciones de la aeronave	2 VHF (8,33 kHz), 1 UHF, 1 HF Iridio (2 canales) 1 radar meteorológico de turbulencias 2 radioaltímetros 2 EGPWS 2 GPS 3 INS 2 NDB 2 VOR/DME Transpondedor de Modo-S Homologación RVSM Homologación MNPS Homologación RNP 1, 4, 5, 10; Homologación de Aproximación RNP; Homologación LNAV/VNAV y LPV CPDLC; ADS-C ADS-B equipamiento exterior	

## 6. Tripulación de vuelo y equipo del proyecto in situ

### Tripulación de vuelo

La tripulación constará de 2 pilotos, 1 ingeniero aeronáutico y 4 ó 5 operadores de instrumentos científicos. Los pilotos cuentan con una sólida formación y son pilotos con experiencia que han trabajado para DLR.

### Equipo científico

El equipo completo (incluyendo la tripulación de vuelo) que se encontrará *in situ* durante la intervención de campo de la aeronave constará de unas 40-50 personas presentes de forma simultánea. Estarán representadas las siguientes áreas/funciones: planificación de vuelos científicos, incluyendo las previsiones meteorológicas; apoyo técnico tanto para la aeronave como para los equipos de instrumentación; operación de los instrumentos (calibración en tierra y operación en vuelo); operaciones de la aeronave; dirección del proyecto y apoyo logístico. **Parte de este equipo será el que estará presente cuando se comience a trabajar con los datos obtenidos por las mediciones en Alemania y que es el objetivo de este concurso el poder acceder a estos y a su análisis y modelamiento in situ.**

### Investigador científico principal

**Prof. Dr. Markus Rapp** Centro Aeroespacial Alemán (DLR) Director del Instituto de Física Atmosférica de DLR

### Equipo científico de coordinación

**Dr. Björn-Martin Sinnhuber** Instituto Tecnológico de Karlsruhe (KIT). Instituto de Meteorología e Investigaciones Climáticas

**Prof. Dr. Martin Riese** Forschungszentrum Jülich GmbH IEK-7

**Prof. Dr. Andreas Engel** Instituto de Ciencias Atmosféricas y Medioambientales Universidad Goethe de Frankfurt

## 7. Zona de mediciones

### Zona geográfica seleccionada para las mediciones

En general, los objetivos científicos de este proyecto requieren unos vuelos en una zona muy amplia, que corresponde al espacio aéreo y las regiones de información de vuelo controlados por Chile y Argentina (incluyendo las zonas oceánicas controladas por Chile y Argentina, la mayoría de las cuales se encuentran al sur de 40° Sur, y también incluyendo vuelos hacia la península antártica (sin aterrizar en la Antártida).

### Altitudes de vuelo

La mayoría de las mediciones que se realicen con HALO tendrán lugar entre los 25.000 y 47.000 pies, con una altitud máxima de vuelo de 51.000 pies, que se alcanzarán solamente durante las etapas finales del vuelo.

### Número total esperado y duración de los vuelos de investigación

El número total de horas de vuelo planificadas para los vuelos locales desde la base en el aeropuerto sudamericano será un bloque temporal de 120 horas (aproximadamente 70 horas durante la Fase 1 y otras 50 horas en la Fase 2), más unas 90 horas para los vuelos de traslado.

La duración típica de un vuelo para una misión científica de HALO es de 7-10 horas, con una duración máxima de vuelo de 11 horas.

Por tanto, el número total de vuelos locales desde la base sudamericana será de unos 14 vuelos (excluyendo los vuelos de traslado): 7-8 durante la Fase 1 más 6-7 durante la Fase 2.

Los vuelos se programarán tanto de día como de noche, aunque durante la parte inicial de la campaña se programarán principalmente de noche.

La planificación de los vuelos individuales comienza unos 2-3 días antes de cada vuelo. La trayectoria de vuelo deberá ajustarse a las condiciones meteorológicas previstas y actuales.

### Trayectorias de vuelo

Aunque algunos vuelos constarán básicamente de unas transecciones lineales con diferentes altitudes, es posible que se pidan unas trayectorias de vuelo especiales (siempre en coordinación con el control de tránsito aéreo). Algunas de estas trayectorias especiales se ilustran de forma esquemática en la Figura 4.

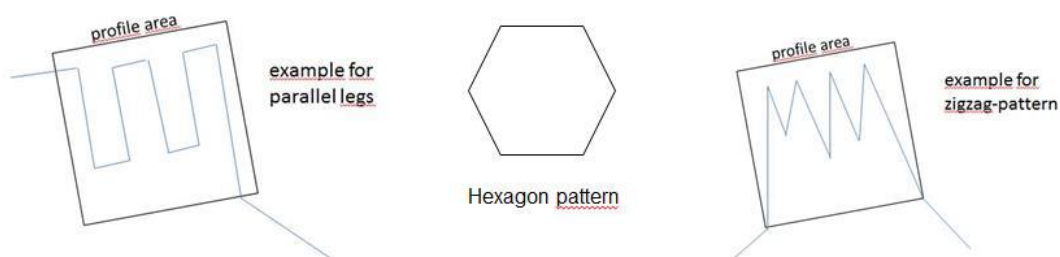


Figura 4. Esquemática de unas trayectorias ejemplares de vuelos laterales (generalmente realizadas a una sola altitud), en donde la duración de los extremos / tramos es de unos 10-60 minutos de vuelo.

### Rutas de vuelo ejemplares

En las siguientes figuras se presentan unos ejemplos de las rutas de vuelo típicas que se esperan para los vuelos de investigación desde una base aeroportuaria ubicada en América del Sur, el programa inicial se encuentra en el sitio web oficial del proyecto <https://www.pa.op.dlr.de/southtrac/general-information/timetable>, este se irá modificando ya que la planificación real y el perfeccionamiento de dichas rutas dependen siempre de las condiciones atmosféricas presentes. A partir de diversos modelos de previsiones atmosféricas y meteorológicas, la planificación detallada de la ruta y del perfil de la altitud para cada vuelo de investigación comienza con una antelación aproximada de 2-3 días. Aunque el concepto global de cada vuelo generalmente se establece en función de requisitos científicos, el grupo de operaciones de vuelo de DLR, actuando en coordinación con todos los centros de control de tránsito aéreo involucrados, confirmará la hora y la ruta de vuelo propuesta.

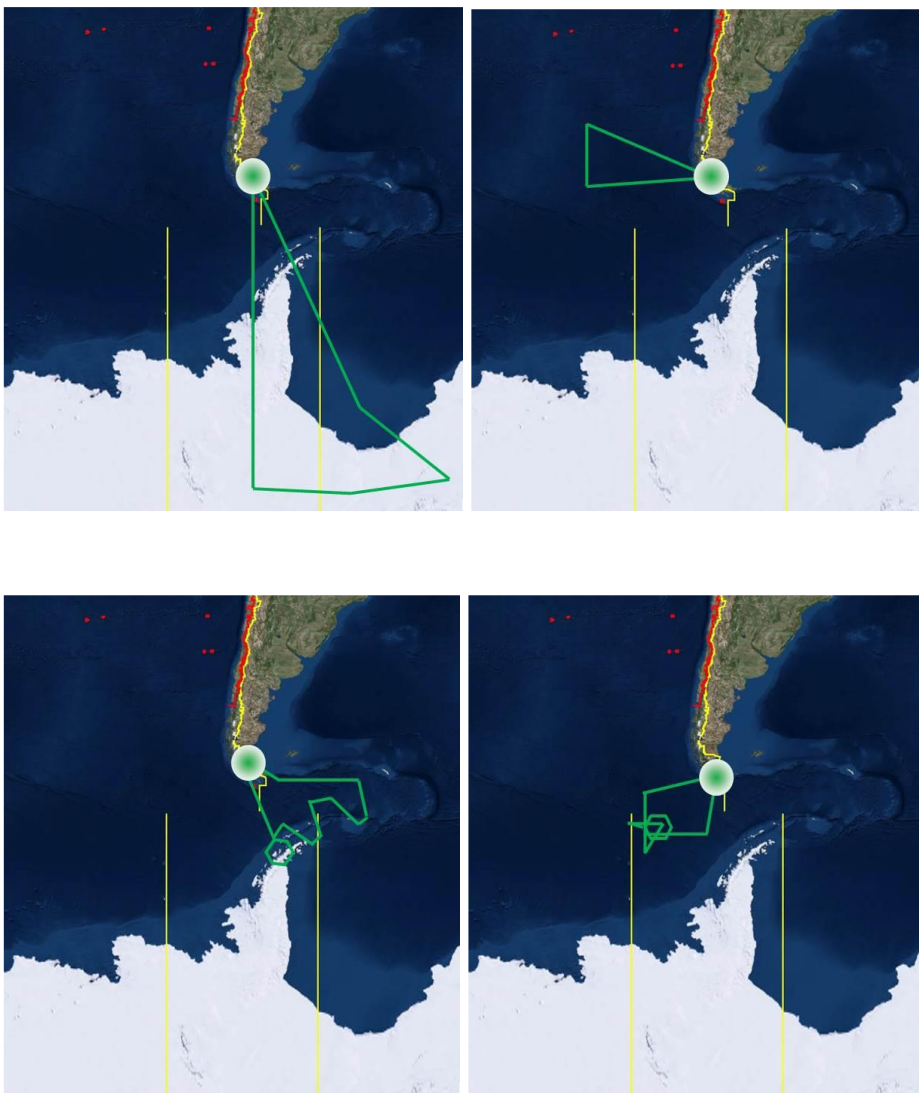


Figura 5. Unas rutas de vuelo ejemplares para diferentes objetivos científicos del proyecto SOUTHTRAC, volando por lo general a una altitud de entre 25.000 y 51.000 pies. Nótese que las rutas de vuelo reales dependerán de las condiciones atmosféricas reales y se planificarán con una antelación de 2-3 días, de forma coordinada con los centros de control de tráfico aéreo. Mapa base <https://difrol.gob.cl/mapas/>

## 8. Breve descripción de los objetivos científicos

El proyecto de investigación "*Transport and Composition of the Southern Hemisphere Upper Troposphere and Lower Stratosphere (SOUTHTRAC)*" (Transporte y composición de la troposfera superior y de la estratosfera inferior en el Hemisferio Sur) investigará el papel de los procesos atmosféricos tanto dinámicos como químicos en la troposfera superior y en la estratosfera inferior (UTLS), así como en la atmósfera central del hemisferio sur, mediante el uso de observaciones atmosféricas realizadas desde la Aeronave Alemana de Investigación de Gran Altitud y Largo Alcance "HALO". Además, se utilizará una amplia gama de modelos numéricos para investigar el impacto tanto regional como global en la circulación y la composición atmosféricas. Los cambios en la composición atmosférica en la UTLS, tales como los cambios del vapor de agua, el índice de ozono y de otros oligogases condicionan de forma significativa el forzamiento radiactivo que es de relevancia para las estimaciones del estado atmosférico en el contexto de un clima cambiante. Por ejemplo, las asimetrías hemisféricas que se observan en los patrones de circulación y de transporte, como son las corrientes en chorro y los sistemas monzónicos, introducen en ambos hemisferios unas diferencias en la composición de la región de la UTLS. Las emisiones que se derivan de la quema de biomasa en el hemisferio sur afectan al ozono en la troposfera superior.

El agujero de ozono de la Antártida da lugar al transporte de aire pobre en ozono y deshidrato hasta la parte más inferior de la estratosfera. Se reconoce también que el agujero en la capa de ozono de la Antártida es un importante impulsor del cambio climático en el hemisferio sur. Apenas disponemos de mediciones de la región UTLS al sur de los 35°S, y existe una gran laguna en los datos que tenemos sobre las zonas entre la región subtropical del sur y el continente antártico. Es más, el impacto de las ondas gravitatorias internas en las corrientes en chorro no se ha investigado nunca mediante experimentos basados en observaciones aéreas. La fuerza del chorro polar nocturno en los modelos de circulación globales es muy sensible a las modificaciones de las parametrizaciones de arrastre de las ondas gravitatorias aplicadas. La comunidad científica denomina este problema "el inexistente arrastre de ondas gravitatorias a 60°S". Asociados con las magnitudes simuladas del chorro polar nocturno nos encontramos los desvíos fríos ("el problema del polo frío") dentro del vórtice polar que, a su vez, influyen en la generación y en la persistencia de las nubes estratosféricas polares y, en última instancia, en la química del ozono. Es necesario delimitar estas parametrizaciones mediante observaciones de las ondas gravitatorias a lo largo del chorro polar nocturno, así como en las regiones donde se excitan las ondas gravitatorias internas.

SOUTHTRAC nace como proyecto alemán nacional conjunto propuesto por el Centro Alemán Aeroespacial (DLR), el Centro Jülich de Investigación, el Instituto Tecnológico de Karlsruhe y las Universidades de Mainz, Frankfurt, Wuppertal y Heidelberg y cuenta con el apoyo del Consejo de Investigaciones Científicas Alemán (DFG). SOUTHTRAC se encuentra dentro del marco de otros programas internacionales como son el proyecto "Procesos estratosféricos-troposféricos y su función en el clima" (SPARC) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas.

El proyecto realizará mediciones de variables atmosféricas como son la temperatura, humedad, viento, y las concentraciones mezcladas de oligogases clave, principalmente a altitudes mayores de 6 km, mediante una combinación única de la espectroscopia, sondas remotas y sensores *in situ* ubicados a bordo de la aeronave de investigación HALO. El proyecto se ha programado para llevarse a cabo entre septiembre y noviembre de 2019, con dos periodos intensivos de observaciones, de unas cuatro semanas de duración cada uno, en la región sureña de América del Sur. La programación del proyecto se ha organizado de esta manera para poder investigar el impacto de la quema de biomasa, la deformación del vórtice polar y la fase tardía del agujero de ozono de la Antártida.

Concretamente, esta localización permitirá al proyecto estudiar los efectos en el flujo de la UTLS, y particularmente los efectos en la distribución de temperaturas en la atmósfera media, de las ondas

gravitatorias internas excitadas por los fuertes vientos del oeste que corren por encima de los Andes y de la península antártica.

## 9. Instrumentos de a bordo de HALO y parámetros de medición

### Aspectos generales

La Tabla 1 contiene un resumen de los instrumentos que componen la carga útil científica de la aeronave de investigación HALO para el proyecto SOUTHTRAC, agrupados por categorías según el tipo de medición al que corresponden (mediante sondas remotas o mediciones *in situ*). Todos los instrumentos estarán cubiertos por certificación de aeronavegabilidad específica para la aeronave HALO y estarán instalados para la duración completa de la misión (incluidos los vuelos de traslado entre Alemania y América del Sur). Los instrumentos individuales que componen esta carga útil se describen con algo más de detalle en el siguiente apartado.

Instrumento	Método de medición	Parámetros diana	Institución
<i>Sensores remotos desde la aeronave</i>			
ALIMA	Lidar a 372 nm y 532 nm (orientado hacia arriba)	Temperatura, densidad del aire, perfiles verticales del viento	DLR-IPA
GLORIA	Sensor infrarrojo del limbo	Temperatura, N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> , CFCs, O <sub>3</sub> , ClONO <sub>2</sub> , ...	KIT / FZJ
miniDOAS	espectrómetro UV/vis	O <sub>3</sub> , O <sub>2</sub> -O <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , HONO, HCHO, C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> , BrO, IO, OClO, H <sub>2</sub> O, ...	Universidad de Heidelberg
<i>Mediciones in situ desde la aeronave</i>			
AIMS	Espectrómetro de masa de ionización química (CIMS)	H <sub>2</sub> O, HCl, ClONO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub>	DLR-IPA
AMICA	<i>Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy</i>	OCS, CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O	FZJ
BAHAMAS con SHARC	Sistema de sensores básicos de HALO	Datos meteorológicos y aviónicos, humedad	DLR-FX
FAIRO	UV fotómetro / quimiluminiscencia	Ozono (O <sub>3</sub> )	KIT
FISH	higrómetro Lyman-Alpha	H <sub>2</sub> O total / fase de gas	FZJ
GHOST-MS	Cromatografía de gases con espectrómetro de masa	CH <sub>3</sub> Br, CHBr <sub>3</sub> , CHCl <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> I, CFCs, SF <sub>6</sub>	Universidad de Frankfurt
HAGAR V	analizador infrarrojos para CO <sub>2</sub> , cromatografía de gases	CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , SF <sub>6</sub> , CFC-12, CFC-11, CFC-113, CCl <sub>4</sub> , ...	Universidad de Wuppertal
IPA-NOY	Quimiluminiscencia	NO (óxido nítrico), NO <sub>y</sub> (nitrógeno reactivo total)	DLR-IPA
UMAQS	<i>Quantum Cascade Laser Absorption Spectroscopy</i>	CO, CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, CH <sub>4</sub>	Universidad de Mainz
<i>Mediciones in situ mediante radiosondas lanzadas desde la aeronave</i>			
KITsonde	Sistema de radiosondas meteorológicas	Temperatura, humedad y perfil del viento	KIT

Abreviaturas para las instituciones: KIT = Instituto Tecnológico de Karlsruhe, Alemania; FZJ = Centro Jülich de Investigación (*Forschungszentrum Jülich*), Alemania; DLR = Centro Aeroespacial Alemán (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*), Oberpfaffenhofen, Alemania; IPA = Instituto de Física Atmosférica; FX = Centro de Experimentos Aéreos

Tabla 1: Relación de instrumentos científicos instalados en la aeronave HALO para el proyecto SOUTHTRAC.



## Descripciones de la instrumentación

A continuación se describen de forma abreviada los instrumentos que forman parte de la carga útil científica a bordo de HALO para la misión SOUTHTRAC, ofreciendo una mayor información y referencias a publicaciones.

**ALIMA** *Airborne Lidar for Studying the Middle Atmosphere* (lidar aéreo para el estudio de la atmósfera media, ALIMA) es un instrumento sensor remoto que mide la temperatura atmosférica y el viento vertical desde aproximadamente el nivel del vuelo hasta una altitud de 105 km. Consta de dos transmisores de pulsaciones láser que operan con longitudes de onda de 372 nm y 532 nm, además de un telescopio receptor, que se utiliza para recolectar la luz láser de retrodispersión, y una unidad de detección óptica que analiza la luz recolectada. Ambos haces láser se transmiten verticalmente hacia arriba a través de una sola ventanilla en el techo de la aeronave. Se utiliza una luz láser emitida a una longitud de onda de 372 nm para sondear la línea de absorción ampliado por Doppler de los átomos libres de hierro en la atmósfera desde una altitud de entre 70 y 105 km. Sintonizando la longitud de onda a lo ancho de la línea de hierro y grabando la señal recibido como una función de la longitud de onda, se puede medir con precisión el espectro Doppler de hierro. Gracias a estas mediciones, se puede recuperar la temperatura atmosférica a partir de la anchura Doppler, además del viento en la dirección de la línea visual (viento vertical) a partir de la desviación Doppler. En la parte inferior de la atmósfera, donde no existen átomos de hierro libre, se utiliza el haz láser de 532 nm como fuente de luz para las mediciones de la densidad del aire y la desviación Doppler (viento vertical). La combinación de ambas técnicas de medición da como resultado unos perfiles con una resolución de aproximadamente 1 km en vertical y 1 km en horizontal.

**GLORIA** El instrumento GLORIA (*Gimballed Limb Observer for Radiance Imaging of the Atmosphere*) analiza la radiación infrarroja que emite la atmósfera de la tierra en la dirección del limbo. El instrumento observa los espectros infrarrojos en la región de longitud de onda de entre 7  $\mu\text{m}$  y 13  $\mu\text{m}$ . Derivamos unas secciones verticales/horizontales de la temperatura y de las concentraciones de oligogases como el ozono, vapor de agua,  $\text{ClONO}_2$ , CFC-11, CFC-12,  $\text{C}_2\text{H}_6$  y otros en estos espectros. Las secciones pueden obtenerse para altitudes de entre la parte superior de las nubes y la altitud de vuelo (aproximadamente 15 km) con una resolución vertical de alrededor de 0,8 km. En el caso de configuraciones de vuelo especiales, se obtendrán distribuciones de estos parámetros atmosféricos incluso en tres dimensiones.

**miniDOAS** El instrumento mini-DOAS (*Differential Optical Absorption Spectroscopy*) es un espectrómetro óptico de 6 canales que analiza la luz del cielo recibida en la dirección del nadir (mirando hacia abajo) y del limbo (dirigida hacia el horizonte). En cada dirección la luz del cielo se analiza en tres bandas de longitud de onda (310–440 nm, FWHM = 0.47 nm; 420–640 nm, FWHM = 1.1 nm 1100–1680 nm, FWHM = 10 nm) para detectar ciertos oligogases y parámetros atmosféricos. Los oligogases seleccionados para su detección son  $\text{O}_3$ ,  $\text{O}_2\text{-O}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , HONO, HCHO,  $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$ , BrO, IO, OClO,  $\text{H}_2\text{O}$ , además de agua líquida y sólida (hielo) y el radio efectivo de las gotas de las nubes.

**AIMS** Se trata de un espectrómetro de masa de ionización química que se utiliza para medir las concentraciones atmosféricas de los oligogases. Los oligogases que mide son el vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), cloruro hídrico (HCl), nitrato de cloro ( $\text{ClONO}_2$ ), ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y dióxido de sulfuro ( $\text{SO}_2$ ). Su uso SOUTHTRAC se dedicará al estudio del vapor de agua. El aire ambiente se succiona hasta el interior de la aeronave a través de una entrada ubicada en el fuselaje. Se añaden al flujo de gas el nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y el pentafluoruro de trifluorometilazufre ( $\text{SCF}_8$ ) para posibilitar la reacción de ionización química. Se detectan y contabilizan los iones en la cámara al vacío de un espectrómetro

de masa comercial de cuatro polos a una frecuencia de 0,5 Hz. Para calibrar el instrumento, se puede a veces añadir al flujo de gas el vapor de agua, HCl, HNO<sub>3</sub> ó SO<sub>2</sub> con las concentraciones típicas de la UTLS.

**AMICA** El instrumento AMICA (*Airborne Mid Infrared Cavity enhanced spectrometer*) ha sido desarrollado por FZJ en colaboración con Los Gatos Research (LGR, [www.lgrinc.com](http://www.lgrinc.com)). El instrumento OA-ICOS (= Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy) consta de dos cavidades con combinaciones intercambiables de láser/detector/espejo para permitir la medición simultánea de varios oligogases en dos regiones de número de ondas seleccionable en la zona infrarroja media (MIR), donde muchos de los oligogases más relevantes absorben la luz. Actualmente, mide el OCS (oxisulfuro de carbono, un precursor del aerosol estratosférico), CO (monóxido de carbono), CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) y H<sub>2</sub>O (vapor de agua en la fase gaseosa con ratios de mezcla superiores a los 200 ppm). AMICA se ha diseñado para operar a bordo de una aeronave a grandes altitudes y se ha implantado con éxito en la M55 Geophysica durante dos campañas, en 2016 y 2017.

**BAHAMAS/SHARC** El *BAsic HALO Measurement and Sensor System* (BAHAMAS) consiste en un sistema de recopilación de datos que realiza un seguimiento de diferentes interfaces de los sistemas aviónicos de la aeronave además de un conjunto de instrumentos que pertenecen al propio sistema. Estos sensores permiten realizar una determinación precisa de los parámetros meteorológicos básicos, como son la presión, temperatura, humedad y el vector de viento en tres dimensiones. Además, se determina la humedad mediante un sensor basado en Lyman-Alpha (SHARC).

**FAIRO** FAIRO (*Fast AIRborne Ozone instrument*) es un instrumento pequeño y ligero para la medición del oligogas ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente. Aplica dos técnicas: (a) un fotómetro que mide la absorción de la luz del O<sub>3</sub> con una longitud de onda de unos 255 nm (emitida por un LED) y (b) un detector seco de quimiluminiscencia que realiza un seguimiento de la luz de quimiluminiscencia (con una longitud de onda de unos 500 nm) emitida por el O<sub>3</sub> que reacciona con una capa de tinte orgánico en la superficie de un pequeño disco sensor.

**FISH** El instrumento *Fast In situ Stratospheric Hygrometer* (FISH) mide el vapor de agua en la atmósfera. La técnica de medición se basa en la fluorescencia fotofragmentaria Lyman- $\alpha$  y es adecuado para medir el vapor de agua en la banda de entre 1 y 1000 ppmv. FISH es un higrómetro de vía cerrada bien establecida, con una amplia trayectoria en el campo de las mediciones de aeronaves y las comparaciones entre instrumentos.

**GhOST-MS** GhOST-MS es un cromatógrafo de gases hecho a la medida con un espectrómetro de masa y un detector de captaciones de electrones. Mide los hidrocarburos halogenados, especialmente los gases agotadores de ozono corta vida como los halocarbonos brominados, que son de interés para nuestra comprensión de la cantidad de halógeno que entre en el estratosfera, donde puede agotar el ozono. En un segundo canal el instrumento mide el SF<sub>6</sub>, que es un importante gas del efecto invernadero y puede utilizarse para derivar datos de la delimitación temporal para el transporte atmosférico. GhOST se ha desarrollado y construido íntegramente en la Universidad Goethe de Frankfurt, Alemania.

**HAGAR-V.** HAGAR-V es un paquete instrumental que consta de tres módulos de medición: i) un analizador infrarrojo no dispersor (NDIR) para el CO<sub>2</sub>, que ofrece unas mediciones extremadamente precisas de la concentración del CO<sub>2</sub> atmosférico (precisión de 0,025 %) con una alta resolución temporal de 1-3 s; ii) un cromatógrafo de gases con dos canales que utiliza la detección de captura de electrones configurada para medir la concentración atmosférica de una serie de oligogases de

larga vida de efecto invernadero y/o agotadores del ozono: CH<sub>4</sub>, SF<sub>6</sub>, CFC-12, CFC-11, CFC-113, CCl<sub>4</sub> cada 90 s; iii) un cromatógrafo de gas que utiliza la detección espectrométrica de gases configurada para medir la concentración atmosférica de una serie de oligogases, de vida larga y corta, del efecto invernadero y/o agotadores del ozono: CFC-11, CFC-113, CH<sub>3</sub>Cl, CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, CHCl<sub>3</sub>, C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>, HFC-125, HFC-134a cada 3 minutos.

**IPA-NOY** Este instrumento aplica una técnica de quimiluminiscencia. El óxido nítrico en el aire ambiente reacciona en una cámara con el ozono y produce una moléculas iluminadoras. La luz es detectada por un fotomultiplicador. Las especies de oligogases medidas son: NO (óxido nítrico) y NO<sub>y</sub> (nitrógeno reactivo total)

**UMAQS** Este instrumento está basado en *Quantum Cascade Laser Absorption Spectroscopy* (QCLAS) y opera a 50 torr. Se utiliza para detectar los gases de efecto invernadero como el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nítrico (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>). El aire se introduce en una celda de medición, donde la atenuación de la luz láser dentro de la celda se utiliza para la determinación del respectivo ratio de mezcla de oligogases. La operación de una bomba al vacío mantiene un flujo continuo a través de la celda de medición. Para controlar el láser y la temperatura interior del instrumento, se utiliza una unidad de refrigeración (*Thermorack* de *AMS Technologies*), basada en un sistema de refrigeración líquida. Para comprobar la estabilidad del instrumento durante el vuelo, se utiliza un cilindro de gas de aire ambiente bajo presión para realizar calibraciones durante el vuelo.

**KITsonde** El sistema modular de radiosonda con múltiples sensores "KITsonde" es un dispositivo de medición meteorológica que se utiliza para obtener unos perfiles atmosféricos de alta resolución. Derivado de las radiosondas meteorológicas que los servicios meteorológicos nacionales lanzan varias veces al día en todas partes del mundo desde estaciones fijas en la tierra para recopilar información sobre la estructura vertical de la atmósfera, KITsonde se despliega desde aeronaves, donde sondea la atmósfera desde el nivel del vuelo hasta la tierra. Lanzados en un contenedor con dispositivo de protección de lanzamiento, las sondas se separan unos pocos segundos después de producirse el lanzamiento y descienden hasta la tierra cada una con su paracaídas. Las configuraciones permiten un total de 4 sondas en cada lanzamiento. La sonda individual mide los siguientes parámetros meteorológicos básicos: temperatura (T), humedad relativa (H), presión atmosférica (P) y la localización (GPS, Galileo, GLONASS, Beidou) a partir de la cual se derivan la velocidad y dirección del viento. Un contador óptico de partículas detecta los aerosoles o las gotas de las nubes y puede lanzarse junto con una sonda meteorológica. Los datos medidos se transmiten a la aeronave usando una banda estrecha de frecuencias dentro de la banda meteorológica de 400 .... 405 MHz. Se pueden recibir datos de hasta 30 sondas activas a la vez. Como alternativa, se puede usar sondas estándares VAISALA, o bien una combinación de los dos sistemas.

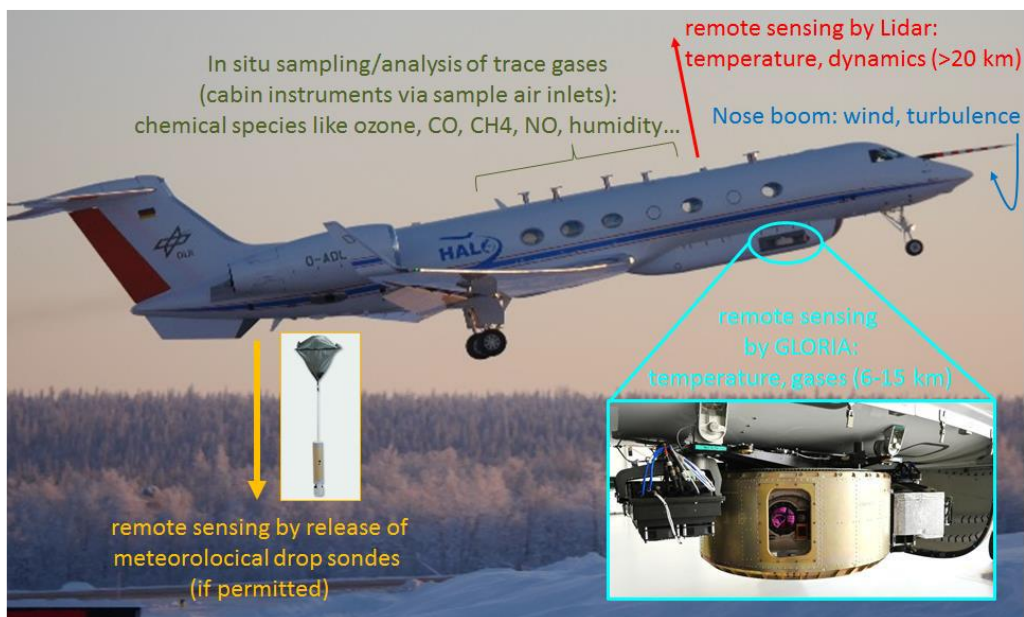


Figura 6. La aeronave HALO en la configuración de SOUTHTRAC, ilustrando las principales categorías de mediciones de la carga útil científica

## 10. Proyectos anteriores con HALO relevantes para SOUTHTRAC

SOUTHTRAC investigará la UTLS del hemisferio sur, ampliando al hemisferio sur los enfoques de las misiones anteriores de la aeronave HALO para investigar la UTLS. Esta región presenta una estructura química y dinámica diferente en comparación con su contraparte del hemisferio norte. La misión TACTS (*Transport and Composition in the UTLS over Europe*) con HALO en 2012 ha ofrecido una visión exhaustiva del impacto del monzón asiático de verano en la región UTLS europea. TACTS ha demostrado que durante los meses de agosto y septiembre unas masas de aire de la capa límite de Asia oriental contribuyen de una forma importante a la composición de la región UTLS del hemisferio norte (Vogel *et al.*, 2014, 2015, 2016; Müller *et al.*, 2016; Gottschaldt, *et al.*, 2017), con un impacto significativo en el vapor de agua (Rolf *et al.*, 2018). Se ha podido cuantificar el efecto de mezcla y transporte a lo ancho del chorro subtropical (Jurkat *et al.*, 2014). Notablemente, GLORIA (*Gimballed Limb Observer for Radiance Imaging of the Pyrophosphate*) ya ha trabajado por primera vez a bordo de HALO durante TACTS (Riese *et al.*, 2014), permitiendo por primera vez los análisis en dos y tres dimensiones de las estructuras de las trazas y de las temperaturas atmosféricas (p. ej. Krisch *et al.*, 2017).

Durante la misión realizada con HALO, llamada POLSTRACC (*The POLar STRATosphere in Changing Climate*) en 2015/16 se investigó el impacto del vórtice ártico en la composición y dinámica de la UTLS del hemisferio norte. POLSTRACC, en especial, ha posibilitado una caracterización de la evolución de la composición de la UTLS ártica entre los meses de diciembre y de marzo bajo la influencia de una mayor actividad de PSC (Höpfner *et al.*, 2018, Voigt *et al.*, 2018) y química del ozono (Groß *et al.*, 2018). Gracias al instrumento GLORIA se ha podido obtener las primeras imágenes tomográficas de la actividad de las ondas gravitatorias (Krisch *et al.*, 2017), además de una visión sin precedentes de la distribución del vapor de agua en la tropopausa (Woiwode *et al.*, 2018). Mediante el uso de la evolución de las relaciones de las trazas en la UTLS, se ha podido cuantificar el impacto, que varía según la estación del año, del transporte y de la mezcla con el aire de las latitudes subtropicales y tropicales (Krause *et al.*, 2018).

Por último, la misión WISE (*Wave-driven Isentropic Exchange*), llevada a cabo con HALO en los meses de septiembre y de octubre de 2017, se centró en unos procesos dinámicos específicos que afectan a la estructura de la tropopausa y el intercambio a través de la misma, así como el presupuesto de ozono y de vapor de agua en la UTLS del hemisferio norte. Estos procesos incluyen la ocurrencia de cirrus en la tropopausa y por encima de ella, así como el papel de la mezcla por encima del chorro durante la evolución de los ciclos de vida baroclínicos. El avance de los primeros resultados de WISE demuestra que la turbulencia puede ocurrir como característica general de los ciclones extratropicales en las regiones de alta estabilidad estática (la capa de inversión de la tropopausa, TIL) asociada a una fuerte cizalladura del viento horizontal (Kaluza *et al.*, 2018).

El proyecto SOUTHTRAC se basa fundamentalmente en la experiencia y en los resultados científicos obtenidos gracias a estos tres proyectos realizados con HALO que se han descrito anteriormente.