

REANÁLISIS CLIMATOLÓGICO ERA5: UNA REVISIÓN SOBRE SU USO EN EL CÁLCULO DE ATENUACIÓN ATMOSFÉRICA EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES SATELITALES

ERA5 CLIMATIC REANALYSIS: A REVIEW ON ITS USE FOR CALCULATING ATMOSPHERIC ATTENUATION FOR SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

Gustavo Siles Soria

Laboratorio de Radiocomunicaciones (LRC)

Universidad Privada Boliviana

gustavosiles@upb.edu

(Recibido el 30 de junio 2022, aceptado para publicación el 10 de julio 2022)

RESUMEN

Parámetros meteorológicos extraídos de reanálisis climatológicos se utilizan como datos de entrada en modelos globales de radiopropagación desarrollados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones, para analizar y cuantificar la atenuación en sistemas de comunicaciones satelitales, producida por la atmósfera y sus elementos naturales constitutivos. En el presente artículo, se realiza una revisión sobre las principales características de ERA5, el reanálisis más reciente del *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* los tipos de datos disponibles, y ejemplos prácticos de cómo realizar la descarga de éstos. A partir de la identificación de una serie de parámetros que tienen interés en radiopropagación, se presenta un resumen de los diferentes modelos y procedimientos que podrían ser utilizados para estimar la atenuación producida por gases, nubes y lluvia.

Palabras Clave: Atenuación Atmosférica, Comunicaciones por Satélite, Propagación de Ondas, Reanálisis ERA5.

ABSTRACT

Meteorological parameters extracted from climatic reanalysis are used as input data in global prediction models developed by the International Telecommunications Union, aimed to analyze and quantify attenuation occurring in satellite communication systems, caused by the atmosphere and its natural constituents. In the present paper, a review of ERA5, the most recent reanalysis from the *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*, and its main characteristics is presented, including the different type of available data as well as practical examples of how to download them from the servers. Once a series of parameters having interest in radiopropagation are identified, a summary on models and procedures that could allow estimating atmospheric attenuation caused by gasses, clouds, and rain is provided.

Keywords: Atmospheric Propagation, Satellite Communications, Radiowave Propagation, ERA5 Reanalysis.

1. INTRODUCCIÓN

El Servicio de Cambio Climático del programa Copernicus (*Copernicus Climate Change Service*, C3S) de la Unión Europea es implementado por el *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) [1]. En términos generales, su misión es dar acceso a datos climatológicos globales que sirvan de apoyo a las tareas de mitigación del cambio climático. Se trata de datos autoritativos que pasan controles rigurosos de calidad (*quality controled data*) antes de ser diseminados para su uso. El acceso a todos los datos generados por C3S es gratuito se realiza a través del portal Climate Data Store (CDS) [2], como punto único de descarga. Entre los productos más populares disponibles en esta plataforma se encuentran los reanálisis ERA5 y ERA5-Land, las Variables Esenciales del Clima (*Essential Climate Variables*, ECV), predicciones estacionales (*seasonal forecasts*) y proyecciones climatológicas CMIP5, CMIP6 y CORDEX. Estos productos, juntos con otros disponibles en CDS, proporcionan información sobre el clima pasado, presente y futuro de nuestro planeta, si bien algunos productos especializados sólo están disponibles para Europa.

Los reanálisis climatológicos o “reconstrucciones” del clima, son el resultado de la combinación de observaciones meteorológicas globales de diferentes fuentes, como pueden ser estaciones convencionales en tierra, marítimas y aéreas, radiosondeos, imágenes satelitales, y datos meteorológicos modelados, obtenidos mediante predicciones numéricas (*NWP, Numerical Weather Predictions*). El propósito final de esta combinación, también conocida como asimilación de datos, es la estimación de las condiciones meteorológicas para un instante de tiempo en el pasado, y para un determinado punto sobre la Tierra, definido sobre una grilla global geográfica [3]. ECMWF tiene un largo historial en el desarrollo de reanálisis climáticos. El año 1979 se realizó el primero, en el marco del proyecto FGGE [6], seguido por ERA-15 en 1995 [7], ERA-40 desarrollado entre los años 2001 a 2003 [8], ERA-Interim que comenzó el año 2006 [9], hasta el más reciente: ERA5. La resolución espacial de los datos meteorológicos, definida por el tamaño de la grilla

geográfica utilizada, también ha mejorado con el paso del tiempo, desde 208 km en FGGE, luego 125 km en los reanálisis ERA-15 y ERA-40, 80 km en ERA-Interim, y aún menos, como se verá más adelante, en el caso de ERA5.

El Grupo de Estudio 3 (SG3) de la ITU-R, es responsable de realizar estudios en el ámbito de la propagación radioeléctrica que conducen a la generación de Recomendaciones, con modelos de estimación de atenuación atmosférica que puedan ser utilizados en cualquier región de nuestro planeta. Dada la estrecha relación entre la radiopropagación y la meteorología, estos modelos requieren normalmente mapas de parámetros meteorológicos de escala global. A la fecha, el SG3 utiliza productos del reanálisis ERA40 y ERA-Interim en algunas de sus Recomendaciones de la serie P. Por ejemplo, para estimar la atenuación debida a vapor de agua, combinando las Recomendaciones ITU-R P.676-12 [10] e ITU-R P.836-6 [11] que permite generar mapas de densidad de vapor de agua en superficie y contenido integrado de vapor de agua, o la atenuación debida a nubes, a partir del contenido integrado de agua líquida reducido en la Recomendación ITU-R P.840-8 [12].

En el ámbito de la radiopropagación, el reanálisis ERA5 ha comenzado a ser utilizado en los últimos años por algunos grupos de investigación, si bien, a la fecha, aún no existen adopciones oficiales por parte de la ITU-R en sus Recomendaciones. En [13, 14], el contenido integrado de vapor de agua es utilizado para estimar la atenuación debido a este componente natural gaseoso, mientras que en [15] este nivel de atenuación se obtiene a partir de los perfiles atmosféricos proporcionados en el reanálisis. En [16], Queyrel *et. al.* mencionan el uso de datos de ERA5 para estimar la atenuación media mensual en cielo claro – producida esencialmente por oxígeno y vapor de agua – y el valor de la temperatura radiativa media durante el experimento de propagación THOR7. En [17], se obtienen estadísticas anuales de atenuación debida a nubes utilizando el contenido integrado de agua líquida disponible en ERA5, con el hallazgo de resultados con mucha menor exactitud en altitudes considerables, alrededor de los 4000 metros. Finalmente, la altura de la isoterma 0°C, importante en la determinación de la altura de lluvia para estimar estadísticas de atenuación por lluvia, se encuentra también disponible en el reanálisis ERA5 y ha sido utilizada por Benarroch *et. al.* [18] en un estudio comparativo con diferentes sensores.

El objetivo del presente artículo es presentar al lector una revisión de los tipos de datos disponibles en ERA5 que pueden ser utilizados en el marco de estudios de radiopropagación, así como los métodos de acceso a éstos y una perspectiva de los posibles usos para estimar la atenuación por gases, nubes y lluvia. Luego de esta breve Introducción, la Sección II describe las características principales del reanálisis ERA5, así como los tipos de datos disponibles. En la Sección III, se presentan ejemplos prácticos de descargas de datos implementados en el Laboratorio de Radiocomunicaciones (LRC) de la UPB, y en la Sección IV se presenta un resumen de los principales parámetros que pueden ser utilizados en radiopropagación y su relación con los métodos propuestos por la UIT-R La Sección V presenta las principales conclusiones del presente trabajo.

2. REANÁLISIS CLIMATOLÓGICOS ERA5

2.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

La familia de datos ERA5 tiene 3 grandes conjuntos de reanálisis, disponible para los siguientes periodos de tiempo, con una resolución temporal de 1 hora:

- ERA5: Cubre el periodo de 1950 a la fecha, estando divididos en 2 periodos: 1950 a 1978 (ERA5 Preliminary) y 1979 a la fecha.
- ERA5-Land: Set especial, únicamente disponible para superficies continentales, que cubre el periodo de 1950 a la fecha.
- ERA5.1: Reprocesado de ERA5, con mejoras en la estratósfera baja, que cubre sólo el periodo 2000 a 2006. Sin embargo, no proporciona valor agregado en cuanto a los parámetros en la baja y medio troposfera, por lo que no tiene interés en el ámbito de la radiopropagación no será analizado en este trabajo.

Los parámetros en alta resolución (HRES) se definen sobre una grilla gaussiana reducida, con espaciamiento cuasi-uniforme, con resolución espacial de 0.28125°, que corresponde aproximadamente a 31 km. Los parámetros atmosféricos son producidos en 137 niveles verticales definidos en el modelo L137 [19]. Este es el formato original de parámetros generado por ECMWF, y se conocen como parámetros en los niveles del modelo o *Model Level*.

A partir de los parámetros *Model Level*, ERA5 genera parámetros atmosféricos interpolados en 37 niveles verticales de presión atmosférica total: 1000, 975, 950, 925, 900, 875, 850, 825, 800, 775, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 225, 200, 175, 150, 125, 100, 70, 50, 30, 20, 10, 7, 5, 3, 2 y 1 hPa, conocidos como parámetros en niveles de presión o *Pressure Level*.

TABLA 1 – CARACTERÍSTICAS GENERALES DE ERA5

Características ERA5	
Periodo	1950 – a la fecha
Resolución horizontal	31 km, 0.28125° grilla gaussiana
Resolución vertical (<i>Model Level</i>)	137 niveles
Resolución vertical (<i>Pressure Level</i>)	37 niveles
Resolución temporal	1 hora
Asimilación de datos	4D-VAR
Modelo ECMWF	CY41R2

Además de los parámetros atmosféricos del tipo *Model Level* y *Pressure Level*, ERA5 produce un tercer conjunto de gran importancia, conocidos como parámetros *Single Level*. Se trata de parámetros de valor único para cada punto geográfico de la grilla. Desde un punto de vista espacial, estos parámetros están definidos sólo en dos dimensiones (2D), a diferencia de los previos, donde la componente vertical añade una tercera dimensión (3D). Algunos ejemplos de parámetros *Single Level* son la cantidad de precipitación, la temperatura a 2 m de la superficie, la temperatura de la isoterma 0°C o parámetros integrados (*vertical integrals and total column*), como el contenido integrado de vapor de agua o el contenido integrado de agua líquida. La Tabla 1 presenta un resumen de las características generales de ERA5. Tanto los parámetros *Pressure Level* y *Single Level* se encuentran además disponibles en formatos de medias mensuales totales como medias mensuales horarias.

Un aspecto adicional que es importante mencionar respecto a los parámetros de ERA5 es que, en general, son instantáneos. Es decir, son válidos para el tiempo especificado, es decir, el año, mes, día, y hora definidos. Sin embargo, cada parámetro representa el valor promedio del mismo para cada elemento de la grilla, i.e. 31 km × 31 km, por tanto, no es capaz de representar la variabilidad en escalas menores a estas dimensiones. Esto es importante tener en cuenta a la hora de comparar medidas obtenidas con instrumentos en tierra que tengan mayor resolución temporal que, normalmente, describe muy bien la variabilidad de un parámetro en una escala espacial mucho menor.

Con el fin de profundizar en el estudio de variables hidrológicas y termodinámicas en superficies continentales, y en general, comprender mejor los procesos que ocurren únicamente en éstas, ECMWF ha generado también el conjunto de datos ERA5-Land [20]. La resolución espacial de los parámetros atmosféricos disponibles en este set de datos es de 9 km, tanto en una base horaria como en el formato de medias mensuales totales y horarios, desde 1950 a la fecha.

2.2. DESCARGA DE PARÁMETROS: SERVIDORES CDS

El servicio CDS del ECMWF almacena en sus servidores los archivos que contienen parámetros atmosféricos del tipo *Single Level* y *Pressure Level*, así como al ERA5-Land, tanto con resolución temporal de una hora como a las medias mensuales. Los primeros se encuentran disponibles con un retraso de 5 días respecto a la fecha actual, y las medias mensuales 5 días antes de la conclusión de mes. Desde este servicio no es posible acceder a parámetros del tipo *Model Level*.

Los formatos de archivos disponibles en CDS son:

- GRIB1: formato ampliamente utilizado para almacenamiento y distribución de datos meteorológicos históricos representados sobre una grilla geográfica. Parámetros *Model Level* están disponibles en la versión 2 de este tipo de archivo o GRIB2. Extensión del archivo: *.grib.
- NetCDF o *network Common Data Format*: formato utilizado para el almacenamiento y distribución de datos o variables multidimensionales. MATLAB® incluye funciones nativas para la lectura y procesado de este tipo de archivos. Extensión del archivo: *.nc.

El primer paso para acceder al servicio CDS requiere la creación de una cuenta gratuita por parte del usuario. La descarga se realiza mediante alguno de los métodos que se resumen a continuación.

Interfaz web CDS: Es el portal principal de acceso a CDS, disponible en <https://cds.climate.copernicus.eu>. El acceso a los parámetros se realiza desde el menú **Product Type>Reanalysis** y están agrupados de la siguiente manera:

- Sets de parámetros tipo *Single Level* con resolución de 1 hora:
 - ERA5 hourly data on single levels from 1950 to 1978 (preliminary version)
 - ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present
- Sets de parámetros tipo *Single Level* promediados mensuales:
 - ERA5 monthly averaged data on single levels from 1950 to 1978 (preliminary version)
 - ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present
- Sets de parámetros tipo *Pressure Level* con resolución de 1 hora:
 - ERA5 hourly data on pressure levels from 1950 to 1978 (preliminary version)

- *ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present*
- Sets de parámetros tipo *Pressure Level* promediados mensuales:
 - *ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1950 to 1978 (preliminary version)*
 - *ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1979 to present*

Se puede comprobar en [21] que la cantidad de parámetros tipo *Single Level* es considerablemente mayor a aquellos parámetros disponibles para diferentes niveles de presión atmosférica en altura (*Pressure Level*). Por otro lado, la interfaz web permite seleccionar la zona geográfica para la cual se desean descargar parámetros, pudiendo ser la superficie terrestre en su totalidad, o una región específica rectangular, limitada por sus coordenadas en latitud Norte y Sur, y longitud Este y Oeste. La resolución con la que se descargan los archivos desde la interfaz web de CDS, en formato NetCDF, es 0.25°, y en caso de trabajar con archivos GRIB, ECMWF recomienda utilizar esa resolución.

API para Python: Como segunda opción de descarga, CDS pone a disposición una API, conocida como **cdsapi**, que permite realizar descargas desde Python. Esta herramienta se encuentra disponible en el repositorio **conda-forge** y su instalación se realiza a través de la instrucción:

```
conda install -c conda-forge cdsapi
```

en cualquier sistema operativo e IDE de Python. Existe documentación detallada sobre el procedimiento de instalación, disponible en [22]. Una vez operativa la API, con la llave de autorización (*API key*) única de cada usuario registrado en CDS, es posible escribir y ejecutar scripts de descarga.

A continuación, se muestra un ejemplo de script en Python que utiliza la API. Se descarga un archivo llamado `test.nc` que contiene el parámetro *Total Column Water Vapor*, correspondiente a las 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 del periodo del 10 al 15 de enero de los años 2003 y 2004:

```
import cdsapi
c = cdsapi.Client()
c.retrieve(
    reanalysis-era5-single-levels,
    {
        product_type: reanalysis,
        variable: total_column_water_vapour,
        year: [2003, 2004,],
        month: 01,
        day: [10, 11, 12,13, 14, 15,],
        time: [00:00, 06:00, 12:00, 18:00,],
        area: [40.5, -3.75, 40.25, -3.5,],
        format: netcdf,
    },
    test.nc)
```

Se puede observar la definición del tipo de datos, i.e. *Single Level* o *Pressure Level*, y la resolución temporal, que puede ser una hora o media mensual, con los siguientes valores:

- `reanalysis-era5-single-levels`
- `reanalysis-era5-pressure-levels`
- `reanalysis-era5-single-levels-monthly-means`
- `reanalysis-era5-pressure-levels-monthly-means`

además de los siguientes *keywords*:

- `product type`: Que puede tomar los siguientes valores
 - `reanalysis`
 - `monthly_averaged_reanalysis`
 - `monthly_averaged_reanalysis_by_hour_of_day`
- `variable`: Nombre del parámetro o los parámetros que se desean descargar. Son nombres definidos por ECMWF. El listado completo puede consultarse en [21].
- `year, month, day, time`: campos que permiten definir los instantes de tiempo para los cuales se descargan los parámetros.
- `area`: Define el área rectangular de interés con puntos geográficos separados 0.25°. Está área se define mediante latitudes y longitudes, con la notación `[N, W, S, E,]`, como se ve en los siguientes ejemplos:
 - Hemisferio norte: `area: [40.5, -3.75, 40.25, -3.5,]`,
 - Hemisferio sur: `area: [-16.5, -68.25, -16.75, -68,]`,
- `format`: Tipo de archivo a descargar, que puede ser `netcdf` o `grib`

Es posible modificar la resolución espacial de 0.25 añadiendo el keyword `grid`. El cálculo del valor de un parámetro con menor resolución es realizado por ECMWF mediante interpolación bilineal, para el caso de parámetros meteorológicos de variación continua, ej. temperatura, precipitación, o del punto más cercano o *nearest neighbor*, para parámetros discretos, ej. tipo de vegetación, tipo de precipitación. Sin embargo, la reducción de la resolución, no mejora en exactitud de los parámetros obtenidos ni describe mejor la evolución de un parámetro. A continuación, se muestra un ejemplo de script que realiza la descarga de un archivo llamado `test2.nc` que contiene los parámetros contenido integrado de vapor de agua (`total_column_water_vapour`) y altura de la isoterma 0°C (`zero_degree_level`) con una resolución de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$.

```
import cdsapi
c = cdsapi.Client()
c.retrieve(
reanalysis-era5-single-levels,
{
    product_type: reanalysis,
    variable: [total_column_water_vapour, zero_degree_level,],
    year: [2003, 2004,],
    month: 01,
    day: [10, 11, 12,13, 14, 15,],
    time: [00:00, 06:00, 12:00, 18:00,],
    area: [40.5, -3.75, 40.25, -3.5,],
    format: netcdf,
    grid: [0.1, 0.1,],
},
test2.nc)
```

El siguiente ejemplo ilustra la descarga del archivo `test3.nc` que contiene la altura potencial (`geopotential`) en 37 niveles de presión atmosférica, con una resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, utilizando el keyword `pressure level`. Este parámetro se encuentra disponible tanto en estos niveles de altura (*Pressure Level*) como a nivel de superficie (*Single Level*)

```
import cdsapi
c = cdsapi.Client()
c.retrieve(
reanalysis-era5-pressure-levels,
{
    product_type: reanalysis,
    variable: [geopotential,],
    year: [2003, 2004,],
    month: 01,
    day: [10, 11, 12,13, 14, 15,],
    time: [00:00, 06:00, 12:00, 18:00,],
    pressure_level: [1,2,3,5,7,10,20,30,50,70,100,125,150,175,200,225,250,300,350,400,
450,500,550,600,650,700,750,775,800,825,850,875,900,925,950,975,1000,],
    area: [-16.4, -68.3, -16.8, -68,],
    format: netcdf,
    grid: [0.1, 0.1,],
},
test3.nc)
```

Toolbox CDS: Como tercera opción para descarga de parámetros, ECMWF ha creado Toolbox CDS, un conjunto de herramientas en la nube que permiten ejecutar instrucciones de descarga y realizar tareas de postprocesado, como crear gráficos o extraer series temporales específicas, entre otras. El acceso a estas herramientas se realiza desde el portal principal de CDS, descrito anteriormente. De cierta manera, se trata de una solución web para usuarios que no cuentan con una instalación local de Python que les permita descargar y hacer un análisis básico de los parámetros obtenidos. El lector interesado en el uso de Toolbox CDS puede encontrar información en [23]. A continuación, se muestra un ejemplo de descarga del parámetro contenido integrado de vapor de agua (`total_column_water_vapour`) a las 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 del periodo del 1 al 6 de enero de los años 2003 y 2004, para los puntos situados en el rectángulo cuyas coordenadas está definidas por el keyword `area`.

```
import cdstoolbox as ct
@ct.application(title=Download data)
@ct.output.download()
def download_application():
    data = ct.catalogue.retrieve(
        'reanalysis-era5-single-levels',
        {
```

```

        'product_type': 'reanalysis',
        'variable': 'total_column_water_vapour',
        'year': ['2003', '2004'],
        'month': '01',
        'day': ['01', '02', '03', '04', '05', '06'],
        'time': ['00:00', '06:00', '12:00', '18:00'],
        'area': [40.5, -3.75, 40.25, -3.5],
    }
)
return data

```

2.3. DESCARGA DE PARÁMETROS: SERVIDORES MARS

El sistema MARS (*Meteorological Archival and Retrieval System*) del ECMWF proporciona acceso al catálogo completo operacional ERA5, formado por parámetros tipo *Model Level*, es decir, en 137 niveles de altura (ver Sección 2.1), tanto en archivos tipo NetCDF o tipo GRIB. La descarga desde los servidores MARS se puede realizar desde Python, utilizando la API CDS, con un set propio de keywords diferentes a los presentados en la Sección 2.2, además de variaciones en la sintaxis que se utiliza en la escritura de los scripts de descarga. Sin embargo, si bien el número de niveles en vertical es mucho mayor, se debe hacer notar que los tiempos de descarga son considerablemente mayores cuando se los compara a las descargas desde los servidores CDS. Estos tiempos son poco prácticos cuando se desea descargar más de un parámetro, o si se requieren periodos mayores a un mes con resolución de 1 hora. A continuación, se muestra un ejemplo de script de descarga del archivo `test4.nc` con los parámetros Temperatura y Humedad Específica en los 137 niveles de altura para el año completo 2019, con resolución temporal de 1 hora y resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$:

```

import cdsapi
c = cdsapi.Client()
c.retrieve('reanalysis-era5-complete', {
    'class': 'ea',
    'date': '2019-01-01/to/2019-12-31',
    'expver': '1',
    'levelist':
'1/2/3/4/5/6/7/8/9/10/11/12/13/14/15/16/17/18/19/20/21/22/23/24/25/26/27/28/29/30/31/32/3
3/34/35/36/37/38/39/40/41/42/43/44/45/46/47/48/49/50/51/52/53/54/55/56/57/58/59/60/61/62/
63/64/65/66/67/68/69/70/71/72/73/74/75/76/77/78/79/80/81/82/83/84/85/86/87/88/89/90/91/92
/93/94/95/96/97/98/99/100/101/102/103/104/105/106/107/108/109/110/111/112/113/114/115/116
/117/118/119/120/121/122/123/124/125/126/127/128/129/130/131/132/133/134/135/136/137',
    'levtype': 'ml',
    'param': '130/133',
    'stream': 'oper',
    'area': '-16.5/-68.25/-16.75/-68',
    'grid': '0.25/0.25',
    'time':
'00:00:00/01:00:00/02:00:00/03:00:00/04:00:00/05:00:00/06:00:00/07:00:00/08:00:00/09:00:0
0/10:00:00/11:00:00/12:00:00/13:00:00/14:00:00/15:00:00/16:00:00/17:00:00/18:00:00/19:00:
00/20:00:00/21:00:00/22:00:00/23:00:00',
    'type': 'an',
    'format': 'netcdf',
}, 'test4.nc')

```

En base a la experiencia del autor, el tiempo aproximado para esta descarga superó las 36 horas. Esto no es debido al tamaño en sí del archivo `test4.nc` (~18.7 MB) sino a la conformación del mismo por parte de MARS

Al descargar archivos desde MARS, los siguientes keywords son nuevos respecto a los que se utilizan en CDS:

- `class`: Siempre tendrá el valor `ea`, que corresponde al reanálisis ERA5.
- `stream`: Puede ser HRES (*High Resolution*) o EDA (*Ensemble*). De interés son los siguientes:
 - `oper`: HRES operacional
 - `mnth`: HRES medias mensuales horarias
 - `moda`: HRES medias diarias
- `type` Tipo de dato que puede ser:
 - `an`: Analysis Parámetros instantáneos en una hora determinada.
 - `fc`: Forecast. Pronóstico de parámetros a partir de uno inicial, por ej. 06:00 o 18:00, y valores a futuro en pasos (*steps*) de una hora.
- `levtype`
 - `ml`: model level

- sfc: single level
- pl: pressure level
- expver: Para ERA5 siempre tendrá el valor 1.
- param: Se trata de un identificador numérico de cada parámetro disponible en ERA5. La lista completa, según el tipo de archivo, GRB o NetCDF, se puede encontrar en [24].
- grid: Tamaño de la grilla. Si se define este parámetro el tipo de archivo debe ser NetCDF.

3. PARÁMETROS ERA5 ÚTILES EN RADIOPROPAGACIÓN

3.1. PARÁMETROS TIPO SINGLE LEVEL

Los siguientes parámetros tipo *Single Level* pueden ser descargados de ERA5 y tienen interés en el ámbito de la radiopropagación:

- *Surface pressure* (Pa): Presión atmosférica en superficie.
- *2m temperature* (K): Temperatura a 2 m de la superficie terrestre.
- *2m temperature dewpoint* (K): Temperatura de rocío a 2 m de la superficie terrestre.
- *Total Column Water Vapour* ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$): Cantidad total de vapor de agua en una columna vertical que se extiende desde la superficie de la Tierra hasta el borde superior de la atmósfera.
- *Total Column Cloud Liquid Water* ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$): Cantidad de agua líquida contenida en gotas de nubes en una columna vertical desde la superficie de la Tierra hasta el borde superior de la atmósfera. Este parámetro no incluye la cantidad de agua contenida en gotas de lluvia, que normalmente tienen mayor tamaño y masa.
- *Total precipitation* (m): Agua líquida y congelada acumulada, debido a lluvia y nieve, que cae sobre la superficie de la Tierra. Es la suma de la precipitación de gran escala (*large-scale*) y convectiva. Es un parámetro acumulado en una hora (ERA5). Si se utiliza, ERA5-Land, el tiempo de acumulación es diferente.
- *Snowfall* (m): Cantidad de nieve acumulada que cae sobre la superficie. Es un parámetro acumulado.
- *Zero Degree Level* (m): Altura por encima de la superficie de la Tierra donde la temperatura cambia de valor positivo a negativo. En caso de existir más de una altura donde existe el cambio de signo, la altura corresponde a la segunda. Es igual a 0 m cuando la temperatura en la atmósfera se encuentra por debajo de 0°C.

La Tabla 2 presenta datos de identificación de estos parámetros, los niveles en los que se encuentran disponibles, y cómo identificarlos en los repositorios de descarga CDS y MARS. Como se puede ver, los parámetros *Surface pressure*, *2m temperature*, *2m temperature dewpoint* y *Total precipitation* se encuentran disponibles dentro del subconjunto ERA5-Land, por tanto, se puede aprovechar de su más alta resolución si se va a trabajar con puntos geográficos en territorios continentales. Los mapas de la Figura 1, generados por ECMWF, muestran sendos ejemplos de mapas globales de algunos de estos parámetros. Sin embargo, como se ha expuesto en la Sección previa, es posible acotar el área geográfica a aquellas que sean de interés según la aplicación.

TABLA 2 – PARÁMETROS METEOROLÓGICOS TIPO SINGLE LEVEL DE INTERÉS EN RADIOPROPAGACIÓN

Nombre de variable CDS	Código MARS	Unidades	Disponible en ERA5-Land
surface_pressure	134	Pa	Si
2m_temperature	167	K	Si
2m_dewpoint_temperature	168	K	Si
total_column_water_vapor	136	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	No
total_column_cloud_liquid_water	78	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	No
total_precipitation	228	m	Si
snowfall	144	m	Si
zero_degree_level	228024	m	No

TABLA 3 – PARÁMETROS METEOROLÓGICOS TIPO PRESSURE Y MODEL LEVEL DE INTERÉS EN RADIOPROPAGACIÓN

Nombre de variable CDS	Código MARS	Unidades
geopotential	129	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
temperature	130	K
specific_humidity	133	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
specific_rain_water_content	75	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$
specific_cloud_liquid_water_content	246	$\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$

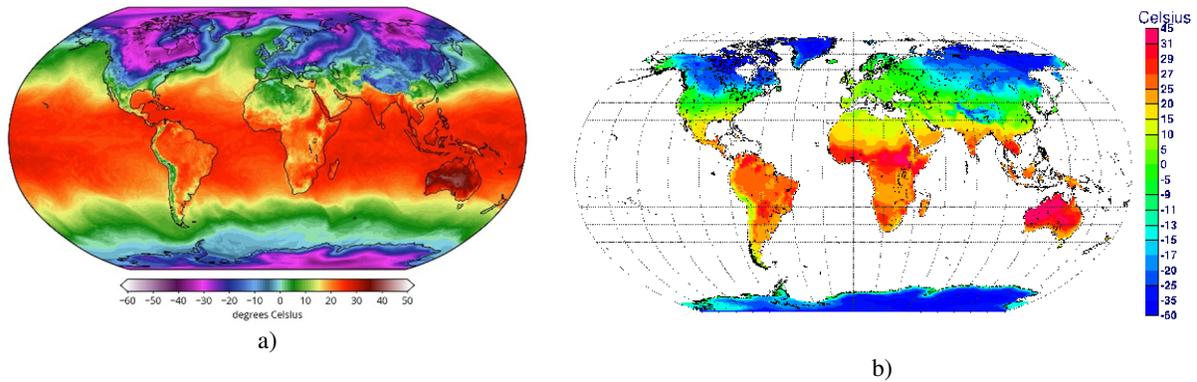


Figura 1: Ejemplos de mapas globales de parámetros tipo *Single Level*. a) Temperatura de superficie ERA5 (06:00 UTC 23/01/1963), b) Temperatura media mensual de superficie ERA5-Land, 02/2019.

Fuente: ECMWF [2].

3.2. PARÁMETROS TIPO PRESSURE Y MODEL LEVEL

Los siguientes parámetros tipo *Pressure* y *Model Level* pueden ser descargados de ERA5 y tienen interés en el ámbito de la radiopropagación:

- *Geopotential* ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$): Energía potencial gravitacional de una unidad de masa, relativa al nivel del mar. Al dividirla entre la aceleración gravitacional ($g = 9.80665 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$) se obtiene la altura geopotencial. Sus variaciones, a nivel de superficie, son comúnmente conocidas como la orografía.
- *Temperature* (K): Temperatura atmosférica.
- *Specific humidity* ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$): Masa de vapor de agua por kilogramo de aire húmedo. La masa total de aire húmedo es la suma de aire seco, vapor de agua, agua líquida en nubes, agua congelada en nubes, lluvia y nieve.
- *Specific rain water content* ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$): Masa de agua resultante de las gotas de agua con el tamaño suficiente para que puedan precipitar, por kilogramo de masa total de aire húmedo.
- *Specific cloud liquid water content* ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$): Masa de agua líquida contenida en nubes por kilogramo de masa total de aire húmedo. La masa total de aire húmedo es la suma de aire seco, vapor de agua, agua líquida en nubes, agua congelada en nubes, lluvia y nieve.

La caracterización física de la atmósfera a lo largo de un trayecto vertical, es fundamental para estimar con mayor detalle la atenuación que se puede producir a lo largo de éste. Existen métodos de obtención de perfiles por medición directa, como los radiosondeos atmosféricos, que históricamente han sido utilizados, y aun son fuente útil de datos, en el campo de la radiopropagación. Sin embargo, su principal falencia ha sido siempre su baja disponibilidad geográfica – se realizan en pocos sitios a nivel mundial – y baja frecuencia de lanzamientos, normalmente uno o dos al día. Métodos indirectos, como el uso de radiómetros frecuencia, proporcionan también perfiles atmosféricos, aunque este tipo de instrumentos son altamente especializados y con un alto coste, por tanto, también disponibles en pocos sitios. Existen además atmósferas estándar de referencia, proporcionadas por la UIT-R [26], basadas en la *US Standard Atmosphere* de 1976. En este sentido, ERA5 es una fuente valiosa de perfiles atmosféricos con 37 niveles de altura (*Pressure Level*), descargables desde CDS, o con 137 niveles de altura (*Model Level*), disponibles desde MARS.

La conformación de un perfil atmosférico requiere de la presión atmosférica, temperatura y humedad relativa o densidad de vapor de agua, y altura geométrica en cada nivel. Para un perfil de 37 niveles, la presión atmosférica total y la temperatura son parámetros de obtención inmediata: el primero dado por la definición de cada nivel (ver Sección 2.1) y el segundo mediante el parámetro *temperature* (ver Tabla 3). En *Model Level*, el cálculo de la presión atmosférica requiere implementar el procedimiento descrito en [27].

Por otro lado, la humedad relativa, *RH*, se expresa como la relación entre la presión parcial de vapor de agua, e en Pa, y la presión parcial de vapor de agua en saturación, $e_{sat}(T)$ en Pa, para una determinada presión atmosférica total P y temperatura T [28]:

$$RH = \frac{e}{e_{sat}(T)} = \frac{Pq \frac{1}{\epsilon}}{e_{sat}(T) \left(1 + q_w \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) \right)} \quad (1)$$

donde $e_{sat}(T)$ está dada por [28]:

$$e_{sat}(T) = a_1 \exp \left\{ a_3 \cdot \left(\frac{T - T_0}{T - a_4} \right) \right\} \quad (2)$$

y q_w es la humedad específica o *specific humidity* en ERA5, $\varepsilon = 0.621981$ es la relación entre la masa molar de aire seco (R_{dry}) respecto a la masa molar de vapor de agua (R_{vap}), $a_1 = 611.21$ Pa, $a_3 = 17.502$ y $a_4 = 32.19$ K para saturación en agua [29], y $a_1 = 611.21$ Pa, $a_3 = 22.587$ y $a_4 = -0.7$ K para saturación en hielo [30], y $T_0 = 273.16$ K. La densidad de vapor de agua, ρ_w en g/m^3 , se puede obtener a partir de la expresión:

$$\rho_w = 216.7 \cdot \frac{e}{T} \quad (3)$$

Finalmente, la altura geométrica, h (m), de cada nivel puede calcularse a partir de su altura geopotencial, h' (m) utilizando la siguiente expresión aproximada [26]:

$$h = \frac{6356.766h'}{6356.766 - h'} \quad (4)$$

donde h' se calcula utilizando el parámetro *geopotential* o la energía potencial gravitacional, dividiendo su valor entre la aceleración gravitacional $g = 9.80665 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Un método alternativo para el cálculo de h toma en cuenta la variación de la aceleración gravitacional $g(\varphi)$ y del radio de la Tierra, $R(\varphi)$ según la latitud φ del punto geográfico de interés, de manera que su valor es igual a [31]:

$$h = \frac{R(\varphi)h'}{G(\varphi)R(\varphi) - h'} \quad (5)$$

$$G(\varphi) = \frac{g(\varphi)}{g} \quad (6)$$

$$g(\varphi) = 9.780325 \frac{1 + 0.00193185 \cdot \text{sen}^2(\varphi)}{\sqrt{1 - 0.00669435 \cdot \text{sen}^2(\varphi)}} \quad (7)$$

$$R(\varphi) = \frac{6378.137}{1.006803 - 0.006706 \cdot \text{sen}^2(\varphi)} \quad (8)$$

De esta manera, es posible extraer, no sólo perfiles horarios o medios mensuales para una ubicación geográfica específica, sino también construir mapas globales con perfiles de temperatura, o densidad de vapor de agua, como se puede ver en la Figura 3, generados por el CNES (*Centre National d'Études Spatiales*) [32]

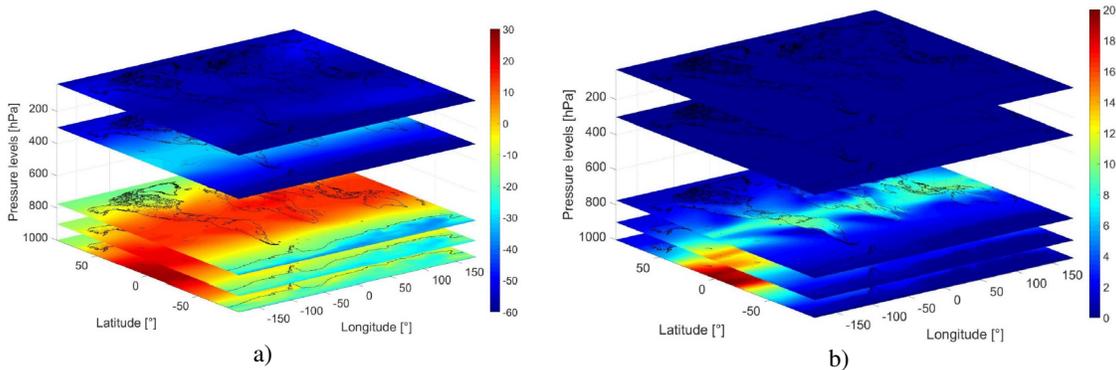


Figura 3: Perfiles verticales medios anuales, para 5 niveles de presión atmosférica, derivados a partir de perfiles medios mensuales del periodo 1991-2020 extraídos de ERA5. a) Temperatura en superficie en $^{\circ}\text{C}$, b) Densidad de vapor de agua en g/m^3 .

Fuente: CNES [31].

Alternativamente, el perfil vertical de ρ_w , así como el de la densidad de agua líquida, ρ_l en g/m^3 , se pueden estimar a partir de los parámetros *Specific humidity* y *Specific cloud liquid water content* (q_l) así como de la densidad de aire húmedo ρ_{moist} en g/m^3 , mediante:

$$\rho_w = 1000 \cdot q_w \cdot \rho_{moist} \quad (9)$$

$$\rho_l = 1000 \cdot q_l \cdot \rho_{moist} \quad (10)$$

$$\rho_{moist} = \frac{P}{R_d T} \left(\frac{1 + w_w}{1 + w_w \frac{R_v}{R_d}} \right) \quad (11)$$

donde P es la presión atmosférica total en Pa, T es la temperatura en K, $R_d = 287.058 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $R_v = 461.52 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, y $w_w = \frac{q_w}{1 - q_w}$.

4. ANÁLISIS

Los parámetros presentados en la Sección 3 podrían utilizarse para la estimación de la atenuación que ocasionan diferentes constituyentes atmosféricos, a una determinada frecuencia. Es importante diferenciar que estas estimaciones pueden ser instantáneas, es decir, la atenuación en un instante de tiempo determinado, o estadísticas, es decir, la distribución probabilística anual o mensual de la atenuación, típicamente en la forma de Funciones de Distribución Acumuladas Complementarias (CCDF, *Cumulative Complementary Distribution Functions*).

4.1. ATENUACIÓN DEBIDA A GASES ATMOSFÉRICOS

Los dos principales gases naturales que ocasionan atenuación en las bandas de operación de sistemas de comunicaciones por satélite, son el oxígeno y el vapor de agua, siendo este último el que presenta mayor intensidad y variabilidad. La UIT-R proporciona, en la actualidad, sendos métodos para estimar tanto la atenuación instantánea como estadísticas anuales de los efectos provocados por ambas especies.

Los perfiles meteorológicos atmosféricos con 37 niveles (*Pressure Level*) o 137 niveles (*Model Level*) son insumo para el cálculo de la atenuación específica debida a oxígeno, γ_o en dB/km, y vapor de agua, γ_w en dB/km, para cada nivel de altura, utilizando el método de la Sección 1 del Anexo 1 de la Rec. ITU-R P.676-12 [10]. Luego, mediante integración lineal, es posible obtener la atenuación debida a oxígeno, A_o en dB, y vapor de agua, A_w en dB, cuyos valores son instantáneos, válidos para el tiempo al cual corresponde el perfil atmosférico. Este procedimiento es usual en el ámbito de la radiopropagación, normalmente realizado a partir de datos meteorológicos de radiosondeos. Sin embargo, dado que estos radiosondeos se realizan con muy baja resolución temporal – en el mejor caso 2 veces al día – y en muy pocos sitios a nivel mundial, su aplicación es restringida. La posibilidad de descargar también perfiles medios mensuales, mediante los métodos presentados en la Sección 2, es una alternativa con un menor coste computacional y que permitiría contar con valores de A_o y A_w medios mensuales. El uso de perfiles de la manera expuesta, se conoce además como el método línea-línea o método exacto, con fuertes fundamentos físicos detrás del cálculo de γ_o y γ_w .

En radiopropagación, el concepto de altura equivalente surge con el objetivo de simplificar el cálculo exhaustivo que demanda el método línea-línea que requiere perfiles atmosféricos. Su uso, recomendado por la UIT.R en la Sección 2.2 del Anexo 2 de la Rec. ITU-R P.676-12 [10], se resume en las siguientes ecuaciones:

$$A_o = \frac{\gamma_o \cdot h_o}{\text{sen } \phi} \quad (12)$$

$$A_w = \frac{\gamma_w \cdot h_w}{\text{sen } \phi} \quad (13)$$

donde γ_o y γ_w se calculan con la presión atmosférica, temperatura y contenido de vapor de agua en superficie, y h_o y h_w son las alturas equivalentes del oxígeno y vapor de agua, en km, respectivamente. El ángulo ϕ corresponde al ángulo de elevación del enlace satelital bajo estudio. Esta aproximación en el cálculo de A_o y A_w – válida en el rango de 1 a 350 GHz – asume que γ_o y γ_w tienen un decaimiento exponencial con la altura, el cual es modelado por h_o y h_w . Es además válido para altitudes menores a 10 km por encima de la superficie, una altura razonable dado que la presencia de oxígeno y vapor de agua es mayoritaria por debajo de la misma, donde se concentra la troposfera. Los parámetros meteorológicos de ERA5 en superficie, o en su defecto de ERA5-Land, pueden ser utilizados para estimaciones instantáneas de A_o y A_w de alguna de las siguientes maneras:

- Utilizando (12) y (13), respectivamente y las expresiones para h_o y h_w dadas en la Sección 2.2 del Anexo 2 de la Rec. ITU-R P.676-12 [10]. Los modelos de h_o y h_w se basan en los perfiles atmosféricos estándar de la Rec. ITU-R P.835-6 [27].
- Derivando de nuevas expresiones matemáticas para h_o y h_w a partir de (12) y (13), donde A_o y A_w se calculan a partir de los perfiles atmosféricos de ERA5, y las atenuaciones específicas de ambos gases a partir de datos en superficie, obtenidos también de este reanálisis. A partir de estos nuevos modelos, es posible aplicar (12) y (13) para estimar A_o y A_w , utilizando como datos de entrada medidas meteorológicas independientes, por ejemplo, las que provienen de redes de estaciones meteorológicas convencionales, o futuras redes de sensores IoT.

La estimación de distribuciones estadísticas anuales o mensuales de A_o y A_w , puede beneficiarse también de parámetros ERA5. Siguiendo las expresiones (12) y (13), es posible estimar CCDFs de ambas atenuaciones, para diferentes porcentajes de excedencia p . Para ello, se podría realizar:

- Estimación de γ_o y γ_w a través de medias mensuales o anuales de presión atmosférica, temperatura y densidad de vapor de agua de medidas locales o de ERA5/ERA5-Land
- Estimación de $h_o(p)$ y $h_w(p)$ a partir de distribuciones mensuales o anuales de presión atmosférica, temperatura y densidad de vapor de agua de medidas locales o de ERA5/ERA5-Land

El reanálisis ERA5 también pueden utilizarse para explotar la relación entre A_w y el contenido integrado de vapor de agua, V (*Integrated Water Content*). Esta relación se expresa mediante la siguiente relación [10]:

$$A_w = \begin{cases} \frac{0.0176 \cdot V \cdot \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{V,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{V,ref}, t_{ref})}, & 1 \text{ GHz} \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ \frac{0.0176 \cdot V \cdot \gamma_w(f, p_{ref}, \rho_{V,ref}, t_{ref})}{\gamma_w(f_{ref}, p_{ref}, \rho_{V,ref}, t_{ref})} (a \cdot h^b + 1), & 20 \text{ GHz} < f \leq 350 \text{ GHz} \end{cases} \quad (14)$$

donde los valores de los parámetros se pueden encontrar detallados en la Sección 2.3 de [10]. En (11), V puede extraerse directamente de ERA5, donde se encuentra como el parámetro $TCWV$ (*Total Column Water Vapor*) con una resolución de 1 hora. Este parámetro, en combinación con (14), ya fue utilizado en [14] para dos diferentes sitios geográficos, con una gran diferencia de altitud, con buenos indicadores de exactitud al compararlos con estimaciones de A_w basadas en radiosondeos. Adicionalmente, como se puede ver en la expresión (15) existe una relación directa entre A_w y V a partir del coeficiente de absorción del vapor de agua, k_v , en dB/mm:

$$A_w = \frac{k_v \cdot V}{\text{sen } \phi} \quad (15)$$

de manera que, utilizando perfiles meteorológicos de ERA5 para estimar tanto A_w como V , es posible calcular k_v y posteriormente obtener una nueva expresión analítica para este parámetro, al relacionarlo con parámetros en superficie también extraídos de ERA5. Distribuciones estadísticas de $TCWV$ pueden también utilizarse en (15), con la nueva expresión de k_v , y estimar distribuciones de A_w .

4.2. ATENUACIÓN DEBIDA A NUBES

La atenuación producida por nubes, A_c en dB, a lo largo de trayectos inclinados en enlaces de comunicaciones por satélite, está ampliamente relacionada con el estudio y disponibilidad de perfiles verticales atmosféricos. Varios modelos han sido estudiados y validados en la literatura, como el de Salonen [34], Salonen08 [35] o Decker [36] parten de la identificación de la presencia de capas de nubes en el trayecto bajo estudio, a través de la definición de un umbral de humedad relativa por encima del cual éstas existen, y posteriormente el cálculo de ρ_l .

En la Sección 1 de [12], la estimación de la atenuación específica debida a nubes, γ_c en dB/km, está dada por la expresión:

$$\gamma_c = k_l \cdot \rho_l \quad (16)$$

donde k_l es el coeficiente de atenuación específica de agua líquida en nubes, en (dB/km)/(g/m³), que depende de la frecuencia y la temperatura. Por tanto, a partir de los perfiles de temperatura y de densidad de agua líquida (ver Sección 3.2) de ERA5, es posible estimar γ_c de (16) e integrando linealmente, estimar el valor de A_c . Es importante mencionar que, por un proceso de integración similar, en este caso a lo largo del perfil de ρ_l , se puede obtener el contenido integrado de agua líquida, L en mm.

La ecuación (17) presenta la relación entre A_c y L , a partir de k_l . Es posible la estimación de estos dos primeros parámetros utilizando los perfiles ERA5. Una vez estimados, puede obtenerse una expresión matemática para k_l ,

$$A_c = \frac{k_l \cdot L}{\text{sen } \phi} \quad (17)$$

Finalmente, ERA5 proporciona la posibilidad de generar nuevos mapas globales de L , que en el reanálisis corresponde al parámetro *Total Column Cloud Liquid Water*. para diferentes porcentajes de tiempo. Este tipo de mapas globales tendrían aplicación directa en la expresión (17).

4.3. ATENUACIÓN DEBIDA A LLUVIA

El método general de cálculo de la atenuación por lluvia, A_r en dB, dado en la Rec. UIT-R P.618 [37], requiere, entre otros, estadísticas de intensidad de lluvia, R en mm/h, con un tiempo de integración de 1 minuto, para calcular γ_r , en dB/km, según:

$$\gamma_r = k \cdot R_{0,01}^\alpha \quad (18a)$$

y luego explotando el concepto de longitud efectiva de lluvia, L_E :

$$A_{r,0,01} = \gamma_r \cdot L_E \quad (18b)$$

Una primera aproximación para obtener $R_{0,01}$ con ERA5 es utilizar calcular la cantidad de lluvia, H en mm, a través de los parámetros *Total Precipitation* y *Snowfall* de la siguiente manera:

$$H = 1000 \cdot (\text{Total Precipitation} - \text{Snowfall}) \quad (19)$$

Dada la resolución temporal de 1 hora, este parámetro representa directamente la intensidad de lluvia, R en mm/h, con un tiempo de integración de 60 minutos. Mediante el método de conversión de estadísticas con diferentes tiempos de integración Rec. UIT-R P.837 [38] es posible tener la distribución de R con un tiempo de integración de 1 minuto, y así extraer de ésta $R_{0,01}$.

Un método alternativo para calcular A_r se podría basar en la suma de contribuciones de atenuación a lo largo del trayecto, estimando R en diferentes capas atmosféricas. Cada una tiene un contenido de agua debido a precipitaciones, M_{rain} en kg/m^3 dado por:

$$M_{rain} = q_{rain} \cdot \rho_{moist} \quad (20)$$

donde q_{rain} es el parámetro *Specific Rain Water Content* de ERA5 y ρ_{moist} está dada por (11). El valor de R puede derivarse a partir de:

$$R = 3600 \cdot \frac{1}{10^9} \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \rho_w \int_{D_{min}}^{D_{max}} N(D) D^3 v(D) dD \quad (21)$$

con $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ y $N(D)$ está dada por la ecuación de Marshall Palmer [39], válida para partículas con diámetro $D > 1 \text{ mm}$ y para climas templados:

$$N(D) = N_0 e^{-\Lambda D} \quad (22)$$

con $N_0 = 8000 \text{ m}^{-3} \text{mm}^{-1}$ y el parámetro Λ dado por:

$$\Lambda = \left(\frac{\pi}{6} \cdot \frac{\rho_w}{M_{rain}} \cdot N_0 \Gamma(\mu + 4) \right)^{\frac{1}{\mu+4}} \quad (23)$$

donde Γ es la función Gamma y $\mu=0$ para aplicaciones en radiopropagación [40]. La función de velocidad terminal de una gota en función del diámetro, $v(D)$, se puede estimar mediante [41]:

$$v(D) = 9.65 - 10.3e^{-0.6D} \quad (24)$$

expresión válida para una presión atmosférica de 1013 hPa y una temperatura de 20°C con una humedad relativa del 50%.

La ecuación (23) debe ajustarse para diferentes altitudes sobre el nivel del mar, en las que disminuye tanto la presión como la densidad atmosférica [42]. Alternativamente, (23) se puede aproximar mediante la siguiente expresión [43]:

$$v(D) = 3.778D^{0.67} \quad (25)$$

5. CONCLUSIONES

Los productos del reanálisis ERA5, producidos por ECMWF y de acceso gratuito a nivel mundial, han despertado el interés de la comunidad científica, en todos aquellos ámbitos donde disponer de datos climatológicos históricos pueden ayudar a la toma de decisiones. El campo de la radiopropagación en sistemas de comunicaciones por satélite es uno ellos, donde la caracterización física de la atmósfera a través de sus parámetros meteorológicos, permite cuantificar, sea de manera instantánea o través de distribuciones estadísticas, la atenuación que producen gases atmosféricos, en particular el oxígeno y el vapor de agua, nubes y lluvia.

En el presente artículo se ha presentado una revisión de las principales características del reanálisis ERA5. Los ejemplos prácticos de descarga se han centrado, en general, en el uso del API de Python, desde donde es posible configurar descargas de parámetros *Single Level* y *Pressure Level* en un entorno de programación muy utilizado en la actualidad, y donde podrían implementarse directamente rutinas de postprocesado. Sin embargo, la interfaz web de CDS es una alternativa de fácil acceso para aquellos usuarios no familiarizados con el lenguaje antes mencionado. Los parámetros *Model Level*, accesibles desde los servidores MARS, presentan el desafío de tener altos tiempos de descarga, lo cual podría limitar su uso, si bien sus 137 niveles verticales dan una mejor caracterización física de la atmósfera.

En términos de aplicación a radiopropagación, el primer insumo que tiene interés son los perfiles meteorológicos que pueden extraerse a partir de parámetros *Pressure Level*. A partir de éstos, el artículo demuestra que existen diferentes métodos analíticos en los cuales éstos pueden aplicarse para estimar valores puntuales, en forma de distribuciones estadísticas, de atenuación debida oxígeno, vapor de agua, y nubes. En el caso de precipitaciones, su alta variabilidad tanto temporal como espacial, podrían ser una limitante a la hora de utilizar ERA5 para su descripción, sin embargo, las expresiones que se han presentado deberían ser puestas a prueba, comparándolas con medidas pluviométricas locales y con los métodos de la UIT-R

Múltiples perspectivas se abren para continuar esta línea de investigación. El estado del arte en la actualidad apunta en la dirección de utilizar, no sólo ERA5, sino otros reanálisis con mayor resolución espacial y temporal en el ámbito de la radiopropagación. Para el caso particular de Bolivia, se comenzará a conformar una base de datos con los parámetros de interés, tanto en superficie como en niveles de presión atmosférica, e implementar los modelos de estimación de atenuación atmosférica presentados en el artículo. En paralelo, se comenzará a recolectar bases de datos meteorológicas locales que permitan validar las predicciones de ERA5.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue parcialmente realizado en el marco de la estancia de investigación posdoctoral realizada por el autor entre diciembre 2020 y febrero 2021 en la Universidad Politécnica de Madrid, gracias al financiamiento de la Fundación Carolina (España), a través de su Programa de Estancias Cortas Posdoctorales 2019-2020.

REFERENCIAS

- [1] Copernicus Program, *The Copernicus Climate Change Service (C3S)*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://climate.copernicus.eu/>
- [2] Copernicus Program, *Climate Data Store (CDS)*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- [3] W. S. Parker, "Reanalyses and observations: What's the difference?" *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 97, no. 9, pp. 1565-1572, 2016.
- [4] H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al. "The ERA5 global reanalysis". *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146: 1999–2049, 2020.
- [5] B. Bell, H. Hersbach, A. Simmons, P. Berrisford, P. Dahlgren, P. A. Horányi, J. Muñoz-Sabater, J. Nicolas, R. Radu, D. Schepers, et al. "The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950". *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 147, 4186–4227, 2021.
- [6] L. Bengtsson, M. Kanamitsu, P.W. Kållberg, S.M. Uppala, "FGGE 4-dimensional data assimilation at ECMWF". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 63, 29–43, 1982.
- [7] J.K. Gibson, P. Kållberg, S.M. Uppala, A. Hernandez, A. Nomura, E. Serrano, "ECMWF re-analysis project report 1, ERA-15 description (version 2)". *Technical Report*, ECMWF, Reading, UK, 1999.
- [8] S.M. Uppala, et al. "The ERA-40 re-analysis". *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961–3012. 2005.
- [9] D.P. Dee, "The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553–597, 2011.
- [10] ITU-R, "Attenuation by atmospheric gases and related effects," ITU-R Recommendation P.676-12, August 2019.

- [11] ITU-R, "Water vapour: surface density and total columnar content," ITU-R Recommendation P.836-6, December 2017.
- [12] ITU-R, "Attenuation due to clouds and fog," ITU-R Recommendation P.840-8, December 2019.
- [13] L. Luini, C. Riva, L. Quibus, D. Vanhoenacker-Janvier, G. Siles, and J. Riera, "Water vapor retrieval to support electromagnetic wave propagation experiments: Results from different techniques," in 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2019, pp. 1-5.
- [14] G. Siles, J.P. Arciénega, Y. Balderrama, "Accuracy assessment of water vapor and cloud attenuation estimated from ERA5 single level parameters at two sites with large difference of altitude," in 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2022, pp. 1-5.
- [15] L. Luini, C. Riva, A. Panzeri, A. Rocha, S. Mota, F. Marzano, A. Marziani, M. Biscarini, F. Consalvi, V. Schena et al., "The MEKaP Project: Measuring Tropospheric Impairments at Ka Band with MEO Satellites," in 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2020, pp. 1-5.
- [16] J. Queyrel, X. Boulanger, L. Castanet, J. Nessel, M. Zemba, T. Prytz, and A. Martellucci, "Preliminary results of the THOR7 propagation experiment in the north pole region," in 25th Ka and Broadband Communications Conference, 2019.
- [17] A. Benarroch, G. Siles, J.M. Riera, "Height of the 0°C Isotherm and the Melting Layer in Madrid: Comparison of Estimations from Different Sensors," in 2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2022, pp. 1-5.
- [18] E. A. Pelat, "Characterization of the tropospheric attenuation affecting earth-space links using ERA5 data," Master's thesis, Politecnico di Milano, 2020.
- [19] ECMWF, L137 model level definitions. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://confluence.ecmwf.int/display/UDOC/L137+model+level+definitions>
- [20] J. Muñoz-Sabater et al., "ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications", *Earth System Science Data*, τ. 13, τχ. 9, σσ. 4349–4383, 2021.
- [21] ECMWF, *ERA5: Data Documentation. Parameter listings*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Parameterlistings>
- [22] Copernicus Program, *How to use the CDS API*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://cds.climate.copernicus.eu/api-how-to>
- [23] ECMWF, *ERA5: Data Documentation. Parameter listings*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation#ERA5:datadocumentation-Parameterlistings>
- [24] Climate Change Service, *CDS Toolbox Documentation*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://cds.climate.copernicus.eu/toolbox/doc/index.html>
- [25] ECMWF, *Parameter Database*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://apps.ecmwf.int/codes/grib/param-db/>
- [26] ITU-R, "Reference standard atmospheres," ITU-R Recommendation P.835-6, December 2017.
- [27] ECMWF, *ERA5: compute pressure and geopotential on model levels, geopotential height and geometric height*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+compute+pressure+and+geopotential+on+model+levels%2C+geopotential+height+and+geometric+height>
- [28] ECMWF, *IFS Documentation, Part IV: Physical Processes*. Último acceso: 14 de mayo, 2022. [Online]. Disponible: https://www.ecmwf.int/sites/default/_les/elibrary/2016/17117-part-iv-physical-processes.pdf#subsection.7.4.2, 2016.
- [29] A. L. Buck, "New equations for computing vapor pressure and enhancement factor," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 20, N°. 12, pp. 1527-1532, 1981.
- [30] O. A. Alduchov and R. E. Eskridge, "Improved magnus form approximation of saturation vapor pressure," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 35, no. 4, pp. 601-609, 1996.
- [31] World Meteorological Organization, *Guide to instruments and methods of observation. Volume I – measurement of meteorological variables, Chapter 12 Measurement of Upper-Air Pressure, Temperature and Humidity* Edition. Geneva. 2018.
- [32] X. Boulanger, *Improvement Of Tropospheric Propagation Instantaneous And Statistical Models For Earth-Space Paths*. CNES Technical Note Ed. 2. Rev. 1. Toulouse. 2021.
- [33] L. Luini, C. Riva, C. Capsoni and A. Martellucci, "Attenuation in Nonrainy Conditions at Millimeter Wavelengths: Assessment of a Procedure," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 7, pp. 2150-2157, July 2007, doi: 10.1109/TGRS.2007.895336.
- [34] E. Salonen and S. Uppala, "New prediction method of cloud attenuation," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 12, pp. 1106–1108, 1991.
- [35] V. Mattioli, P. Basili, S. Bonafoni, P. Ciotti, and E. Westwater, "Analysis and improvements of cloud models for propagation studies," *Radio Science*, vol. 44, 2009.

- [36] M. Decker, E. Westwater, and F. Guiraud, "Experimental evaluation of ground-based microwave radiometric sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 17, no. 12, pp. 1788–1795, 1978.
- [37] ITU-R, "Propagation data and prediction methods required for the design of earth-space telecommunication systems," ITU-R Recommendation P.618-13, December 2017.
- [38] ITU-R, "Characteristics of precipitation for propagation modelling," ITUR Recommendation P.837-7, June 2017.
- [39] J. S. Marshall and W. M. K. Palmer, "The distribution of raindrops with size," *Journal of Meteorology*, vol. 5, no. 4, pp. 165-166, 1948.
- [40] M. O. García, N. Jeannin, L. Féral, and L. Castanet, "Use of WRF model to characterize propagation effects in the troposphere," in 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2013, pp. 1377-1381.
- [41] R. Gunn and G. D. Kinzer, "The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air," *Journal of Meteorology*, vol. 6, no. 4, pp. 243-248, 1949.
- [42] G. B. Foote and P. Du Toit, "Terminal velocity of raindrops aloft," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 8, no. 2, pp. 249{253, 1969.
- [43] D. Atlas and C. W. Ulbrich, "Path-and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1{3 cm band," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 16, no. 12, pp. 1322{1331, 1977.