



Servicio
Meteorológico
Nacional

Evaluación de seis metodologías para analizar ajustes y tendencias de los datos de los tres principales gases de efecto invernadero en la estación de vigilancia atmosférica global de Ushuaia. Parte 1: dióxido de carbono (CO₂)

Nota Técnica SMN 2021-91

Gerardo Carbajal Benítez¹, María Elena Barlasina¹ y Lino Condori¹.

¹*Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, SMN.*

Mayo 2021

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

El presente trabajo presenta seis metodologías para ajustar y calcular la tendencia de los datos de dióxido de carbono (CO₂) y elegir objetivamente la más adecuada, para aplicarla los datos obtenidos en la Estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) Ushuaia. También se utilizan para reforzar las conclusiones datos de CO₂ globales y del Observatorio Mauna Loa. Las tres series de tiempo se igualan a las de Ushuaia (octubre de 1994 a diciembre 2020). Los métodos son polinomios; de 1er orden o lineal, polinomios de 2do y 3er orden, el método no paramétrico de suavizado LOESS, polinomios de 1er y 2do orden más la función seno. El análisis de los residuales para cada metodología es determinante, debido a que es el criterio que tomamos para evaluar cual es la mejor opción para los datos de CO₂ para la VAG Ushuaia. Y encontramos que LOESS suavizado es la mejor opción para el ajuste, debido a que sus residuales no presentan una tendencia significativa, mientras que los demás métodos sí tienen en sus residuales una determinada tendencia. Posteriormente, se analiza las correlaciones para cada método y se encuentra que el polinomio de 2do y 3er orden son los que el que mejor correlación presentan (ambos; $r^2 = 0.9969$). Otra situación que se encuentra es que los polinomios de 1er y 2do orden más la función seno, tienen buena correlación (ambos, $r^2 = 0.9954$) pero cuando se usan las series completas de los datos globales y del Observatorio Muna Loa (1980 y 1958, respectivamente), estos no pueden reproducir las variaciones que se producen aproximadamente en el año 1992, situación que se observa en el ajuste y en los residuales.

Abstract

This work shows six methodologies to adjust and calculate the trend of the carbon dioxide (CO₂) data, and objectively choose the most suitable one, to apply to data obtained in the Ushuaia Global Atmospheric Watch Station (GAW). Global CO₂ data and from the Mauna Loa Observatory are also used to reinforce conclusions. The three-time series are equal in length to that of Ushuaia (October, 1994 to December, 2020). The methods are polynomials; 1st order or linear, 2nd and 3rd order polynomials, LOESS nonparametric smoothing method, 1st and 2nd order polynomials including the sine function. The analysis of the residuals for each methodology is decisive, because it is the criterion, we take to evaluate which is the best option for the CO₂ data for the Ushuaia GAW. We find that smoothed LOESS is the best option for the adjustment, because its residuals do not show a significant trend, while the other methods do have a certain trend in their residuals. Subsequently, the correlations for each method are analyzed and it is found that the 2nd and 3rd order polynomials are the ones with the best correlation (both; $r^2 = 0.9969$). Another situation found is that the 1st and 2nd order polynomials plus the sine function have good correlation (both, $r^2 = 0.9954$) but when the complete series of global data and the Mauna Loa Observatory (1980, and 1958 are used, respectively), these cannot reproduce the variations that occurred approximately since 1992, a situation that is observed in the adjustment and in the residuals.

Palabra clave: Dióxido de carbono (CO₂), VAG Ushuaia, Mauna Loa, Globales, polinomios, LOESS, Residuales y correlaciones.

Citar como:

Carbajal, B., G., Barlasina, M. E., y Condori, L., 2021: Evaluación de seis metodologías para analizar ajustes y tendencias de los datos de los tres principales gases de efecto invernadero en la estación de vigilancia atmosférica global de Ushuaia. Nota Técnica SMN 2021-91.

1. INTRODUCCION

En términos generales, el CO₂ es parte de una familia que pertenece a los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI). Los GEI son gases de origen natural y antropogénico, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes, atrapando calor en la atmósfera dando lugar al efecto invernadero

Cambios en la concentración atmosférica de los GEI, en la radiación solar y en las propiedades superficiales del suelo afectan la absorción, dispersión y emisión de la radiación dentro de la atmósfera y en la superficie de la tierra. Los resultados positivos o negativos en el balance energético debido a estos factores son expresados como forzamiento radiativo, el cual es usado para comparar la influencia en el calentamiento o el enfriamiento sobre el sistema climático. Un forzamiento radiativo positivo tiende a calentar la troposfera y uno negativo tiende a enfriarla. El incremento de los GEI produce un forzamiento positivo, de tal manera que tiene una importancia el medir y calcular, la velocidad con la que se incrementan los GEI, para determinar su impacto en la atmósfera y el clima.

Cualquier cambio en la tendencia de los GEI, podría tener impactos importantes en la naturaleza y en las actividades humanas, a través del cambio climático. Debido a esta posible afectación, es necesario realizar un adecuado análisis de este tipo de cambios o tendencias, y para ello se requieren datos a resolución temporal anual. La recopilación de esta información a escala global es una tarea bastante compleja, en parte a la limitada disponibilidad de series de datos, debido al déficit de mediciones a lo largo del mundo.

El Programa de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) o en inglés Global Atmosphere Watch (GAW) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) organiza, participa y coordina mediciones de la composición química de la atmósfera a escala global, particularmente de los GEI. De esta manera, proporciona información científica confiable para los encargados de formular políticas, apoya las convenciones internacionales y contribuye a mejorar la comprensión del cambio climático y la contaminación atmosférica transfronteriza a largo plazo.

Esta Nota Técnica tiene por objetivo analizar las distintas maneras y metodología de medir tendencias de los GEI (CO₂, CH₄ y N₂O), a través de distintos tipos de regresión, de los datos producidos en superficie a nivel global, en el Observatorio Mauna Loa (Hawái), Estación VAG Cape Grim (Australia) y Estación VAG Ushuaia. De esta manera establecer el tipo de regresión adecuada para la elaboración del Boletín GEI del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

2. LOS DATOS

Los datos que se usan son a escala global (GL) y puntuales, tal como el observatorio de Mauna Loa (MLO) y la estación VAG Ushuaia (USH). Dichos datos son obtenidos a través de muestras de aire, de tres o cuatro veces por mes, en promedio y posteriormente analizados por técnicas de espectrometría.

Todos los datos se expresan como una fracción molar de aire seco, que se define como el número de moléculas de dióxido de carbono dividido por el número de todas las moléculas en el aire, incluido el propio CO₂, una vez eliminado el vapor de agua. La fracción molar se expresa como partes por millón (ppm). Ejemplo: 0,000400 se expresa como 400 ppm.

2.1 Datos Globales

Los datos son proporcionados por la División de Monitoreo Global del Laboratorio (GML) de Investigación del Sistema Terrestre / NOAA, que ha medido el CO₂ y otros gases de efecto invernadero durante varias décadas, a través de una red distribuida mundialmente de sitios de muestreo de aire (Conway, 1994). Los datos del último año son todavía preliminares, pendientes de recalibraciones de gases de referencia y otras comprobaciones de control de calidad.

El Grupo de Ciclo de Carbono GML de la NOAA calcula los valores medios globales de la superficie usando mediciones de muestras de aire semanales de la Red Cooperativa Global de Muestreo de Aire (Conway y otros, 1994; Dlugokencky y otros, 1994; Novelli y otros, 1992; Trolier y otros, 1996). Los valores globales se pueden calcular para casi todas las especies de gases traza e isótopos estables medidos rutinariamente por GML y el INSTAAR de la Universidad de Colorado (UC). A continuación, describimos brevemente nuestra metodología para calcular los valores medios de la superficie global, ilustrada con CO₂.

La estimación global se basa en mediciones de un subconjunto de sitios de la red. Solo se consideran los sitios donde las muestras son predominantemente de aire de la capa límite marina (MBL) bien mezclado representativo de un gran volumen de la atmósfera. Estos sitios "MBL" se encuentran típicamente en ubicaciones marinas remotas al nivel del mar con vientos terrestres predominantes. Las mediciones de sitios en altitud (por ejemplo, Mauna Loa) y de sitios cercanos a fuentes y/o sumideros antropogénicos y/o naturales (por ejemplo, Park Falls, Wisconsin) se excluyen de la estimación global. El uso de datos MBL da como resultado una representación de bajo ruido de la tendencia global y nos permite hacer la estimación directamente a partir de los datos sin la necesidad de un modelo de transporte atmosférico.

Para la estimación de las medias globales de la superficie son realizadas por GML y UC/INSTAAR (para isótopos estables). Los experimentos de comparación rutinarios y en curso dentro de los laboratorios de Boulder, ayudan a garantizar que las mediciones sean coherentes con respecto a la calibración y la metodología (OMM, 2009). Todos los datos utilizados para construir las estimaciones globales han sido analizados por los investigadores principales. Para el cálculo de la estimación global, solo se consideran las mediciones que se determina que están libres de artefactos de muestreo y análisis.

El Centro Mundial de Datos de Gases de Efecto Invernadero (WDCGG) de la OMM, también publica promedios globales de CO₂, CH₄ y N₂O. El WDCGG utiliza métodos de extensión de datos y ajuste de curvas, muy similares a los desarrollados por NOAA (Tsumumi y otros, 2009b), pero además de los sitios de la capa límite marina, el WDCGG incluye muchas ubicaciones continentales fuertemente influenciadas por fuentes y sumideros de la biósfera local y también por emisiones de combustibles fósiles. El WDCGG también incluye sitios de múltiples laboratorios independientes, lo que plantea el problema de posibles instrumentos debido a diferencias de escala o medidas. El promedio global de WDCGG tiene una compensación media positiva de ~ 0.35 ppm y una amplitud de ciclo estacional mayor en comparación con los resultados de NOAA. Se espera que la estimación de MBL sea más baja que un promedio de superficie global completo, porque no están representadas las áreas con alta carga de combustibles fósiles, debido a las emisiones recientes. Por otro lado, la troposfera completa (hasta ~ 8-15 km de altitud) y especialmente la estratosfera con menor fracción molar de CO₂ no están representadas en ninguno de los cálculos. Observamos que el CO₂ aumenta aproximadamente al mismo ritmo en todos los lugares donde se mide. Debido a que el CO₂ es un gas de larga vida en la atmósfera, las emisiones en cualquier lugar contribuirán en aproximadamente a lo largo de un año. No se pueden "ocultar" las emisiones de CO₂ de los sitios de MBL durante más de un mes. Por lo tanto, el MBL ofrece probablemente la mejor representación con bajo nivel de ruido del aumento global actual de CO₂. Seguimos basando nuestro promedio global en sitios MBL porque no está claro cómo ponderar adecuadamente los sitios continentales en un promedio global. Nuestra evidencia hasta ahora indica que el

promedio global de MBL de la NOAA es representativo, internamente consistente y estable en el tiempo con respecto a la adición de nuevos sitios de MBL.

Los datos son diarios, posteriormente se calculan las medias mensuales para usarlos en el ajuste. El período de tiempo es desde enero de 1980 hasta diciembre del 2020.

2.2 Observatorio Mauna Loa, Hawái

La ubicación del Observatorio Mauna Loa (Lat.: 19,5362° N, Long: 155,5763° O, altitud 3397 m s.n.m) está cerca de la mitad del océano más grande del mundo (Océano Pacífico) y cerca de la cima de la montaña. El Observatorio puede considerarse una de las mejores ubicaciones en la tierra para realizar estas mediciones, teniendo una altura aproximada de 3400 m s.n.m. La NOAA observa las siguientes ventajas de ubicación: El aire no perturbado, la ubicación remota, la influencia mínima de la vegetación y la actividad humana, en MLO estas condiciones son ideales para monitorear los componentes en la atmósfera que pueden causar el cambio climático.

Las muestras se analizan bombeando lentamente aire dentro de un pequeño cilindro con ventanas planas en ambos extremos. Se hace pasar luz o radiación infrarroja a través de la primera ventana, posteriormente la luz pasa a través de la celda y finalmente pasa por la segunda ventana, donde se encuentra un detector que es sensible a la radiación infrarroja. Debido a que el CO₂ absorbe radiación infrarroja en la atmósfera, también lo hace en la celda, de tal manera que, si hay más CO₂ en la celda, éste atenúa la radiación infrarroja al llegar al detector.

Todos los valores de las mediciones, se calibran con la frecuencia necesaria, de tal manera que se comparan con equipos de alta precisión y la diferencia no supera los 0.2 ppb.

Los datos son diarios, posteriormente se calculan las medias mensuales para usarlos en el ajuste. El período de tiempo es desde enero de 1980 hasta diciembre del 2020.

2.3 Estación VAG Ushuaia, Argentina

La estación VAG Ushuaia (54.84846°S 68.31069°O, altitud 18), está ubicada en el extremo sur de la península de Ushuaia, La misma fue emplazada estratégicamente para recibir los vientos constantes del (SO) provenientes del Canal Beagle, los cuales se usan como condición base. Las muestras de flask se toman cada dos semanas, y solo si ese día representa condición base. Luego de juntar dos muestras una caja esta lista para ser enviada a la NOAA de los EEUU para su posterior análisis, aunque pueden ser almacenadas por varios meses en la estación sin riesgo a pérdida ya que la misma queda sellada.

Las muestras son analizadas usando la misma técnica de análisis que las muestras de los datos globales y las obtenidas en el observatorio Mauna Loa, ambos de CO₂ y que se han descrito anteriormente.

Los datos son diarios, posteriormente se calcula las medias mensuales para usarlos en el ajuste. El periodo de tiempo es desde octubre de 1994 hasta diciembre del 2020.

3. METODOLOGIA

Los métodos son polinomios; de 1er orden o lineal, polinomios de 2do y 3er orden, el método no paramétrico de suavizado LOESS (Local Regression), polinomios de 1er y 2do orden más la función seno. El análisis de los residuales para cada metodología es determinante, debido a que es el criterio que tomamos para evaluar cual es la mejor opción para los datos de CO₂ para la VAG Ushuaia.

4. RESULTADOS

4.1 Ajustes y tendencias

En los datos de CO₂ podemos observar dos patrones que repiten año tras año: 1) una tendencia que se incrementa a lo largo de la serie, y 2) una oscilación a lo largo de toda la serie.

Empezaremos por suavizar la tendencia al encontrar un modelo que explique mejor la variabilidad general, luego eliminaremos esa tendencia de los datos para explorar el componente cíclico.

4.1.1 Ajuste Lineal

Podemos intentar modelar la tendencia, ajustando una línea recta a los datos utilizando un procedimiento de análisis de regresión estándar. La línea en negro representa los datos de CO₂ y la línea ajustada se muestra en rojo (Figura 1).

$$Y = a_0 + a_1 * X$$

$$CO_2 \text{ (ppm)} = a_0 + a_1 * (\text{Año})$$

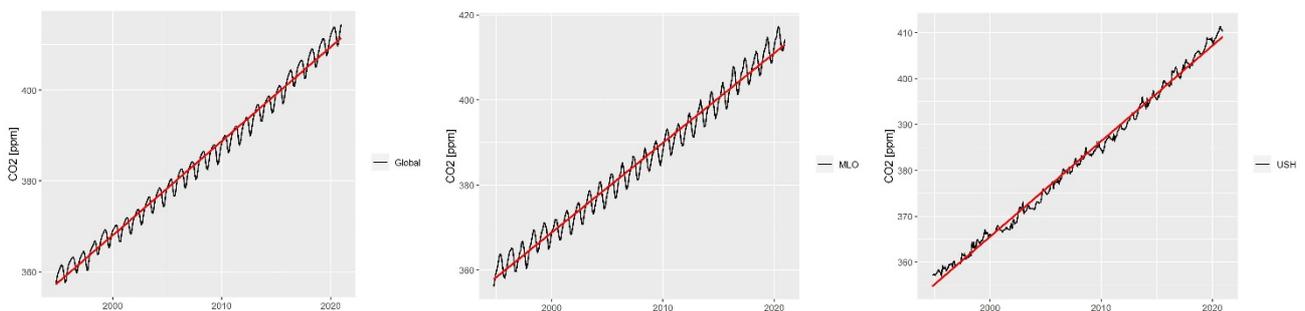


Figura 1. Incremento de CO₂ desde octubre del 1994 a diciembre del 2000. a) a la izquierda es el global, al centro es el Observatorio Mauna Loa (MLO) y a la izquierda la Estación VAG Ushuaia (USH).

A continuación, restamos la línea modelada de los datos de CO₂ (CO₂ – CO₂corr). Esto nos da los **residuos** (Figura 2). Se puede observar que una tendencia sigue presente. Esto sugiere que nuestro modelo lineal simple no tiene un buen desempeño al representar nuevamente una tendencia.

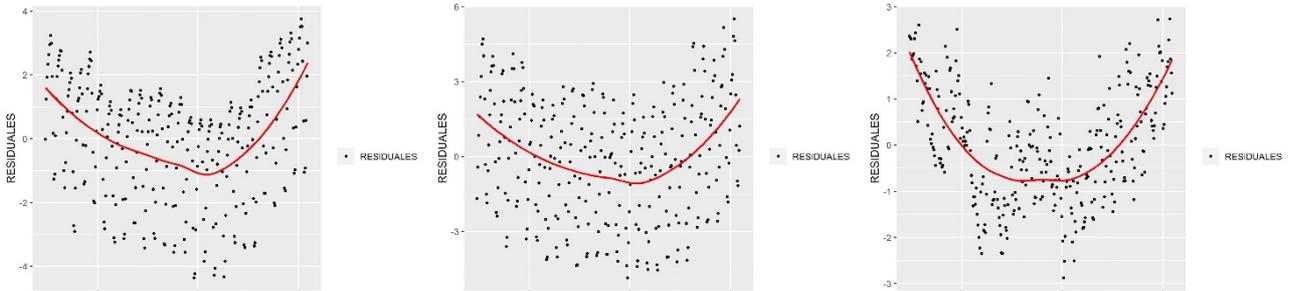


Figura 2. Análisis de residuales. Izquierda corresponde a los datos globales. Al centro son del Observatorio Mauna Loa y a la derecha la estación VAG Ushuaia.

4.1.2 Polinomio de Segundo Grado

Si observamos la tendencia de los datos de CO₂, notamos que es ligeramente convexa. Ahora vamos a intentar ajustar la tendencia usando un polinomio de segundo orden de la forma (Figura 3):

$$\text{CO}_2 \text{ (ppm)} = a_0 + a_1 * (\text{Año}) + a_2 * (\text{Año}^2)$$

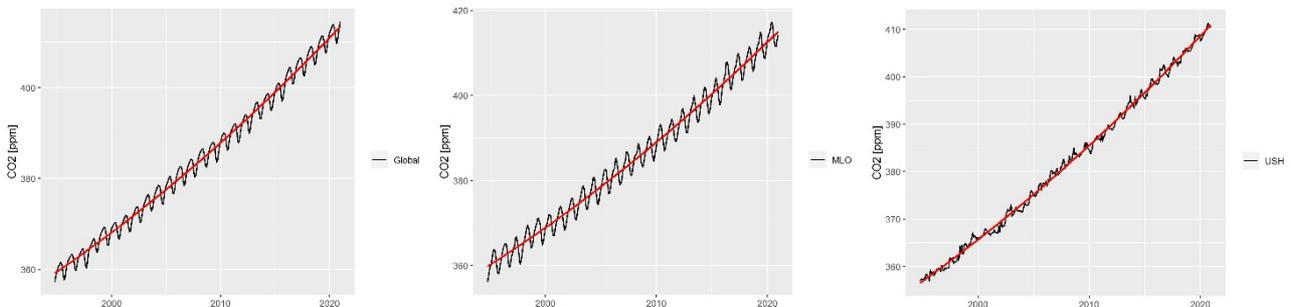


Figura 3. Incremento de CO₂ desde octubre del 1994 a diciembre del 2000. a) a la Izquierda es el global, al centro es el Observatorio Mauna Loa (MLO) y a la izquierda la Estación VAG Ushuaia (USH).

Ahora, veamos los residuos, usando la misma metodología que en la lineal. Recordando que esto nos ayuda a discernir cualquier patrón en nuestros residuos y agregamos un LOESS suave para ajustar los residuos y nos permita visualizar si se nota una tendencia (Figura 4).

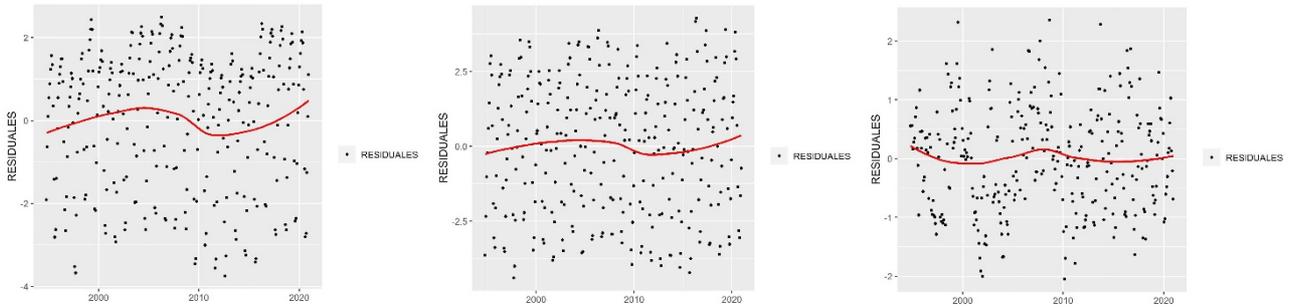


Figura 4. Análisis de residuales. Izquierda corresponde a los datos globales. Al centro son del Observatorio Mauna Loa y a la derecha la estación VAG Ushuaia.

Se observa una mejora con respecto al modelo de regresión lineal (ajuste polinomial de primer orden). Sin embargo, todavía podemos distinguir una tendencia en forma de “N” en los datos globales y de Mauna Loa y una forma de “W” en la estación de Ushuaia.

4.1.3 Polinomio de Tercer Grado

Podemos probar con un polinomio de tercer orden y ver si mejoramos las anteriores situaciones (Figura 5).

$$\text{CO}_2 \text{ (ppm)} = a_0 + a_1 * (\text{Año}) + a_2 * (\text{Año}^2) + a_3 * (\text{Año}^3)$$

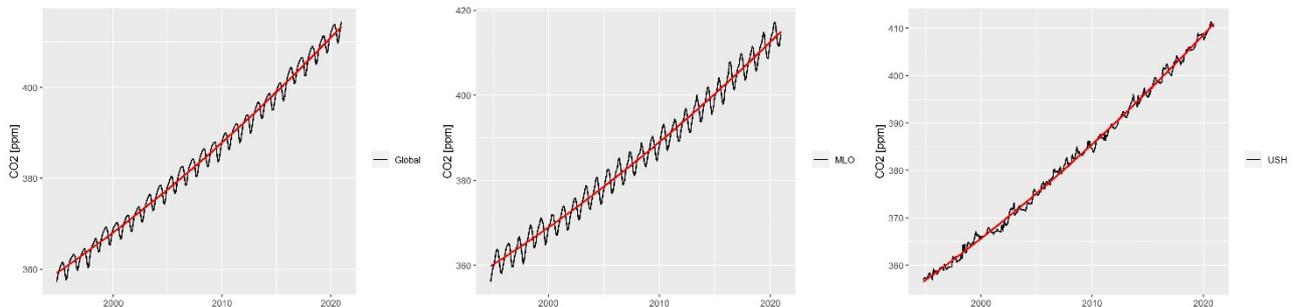


Figura 5. Incremento de CO₂ desde octubre del 1994 a diciembre del 2000. a) a la izquierda es el global, al centro es el Observatorio Mauna Loa (MLO) y a la izquierda la Estación VAG Ushuaia (USH).

Ahora calculamos los residuales (Figura 6).

Se puede observar claramente que no hay una mejora con respecto al polinomio de segundo orden. Nuevamente encontramos una tendencia en los datos globales y Mauna Loa en forma de “N” y la estación de Ushuaia en forma de “W”.

En este punto, podríamos realizar pruebas con polinomios de diferentes órdenes en un intento de suavizar la tendencia o podemos optar por un ajuste no paramétrico.

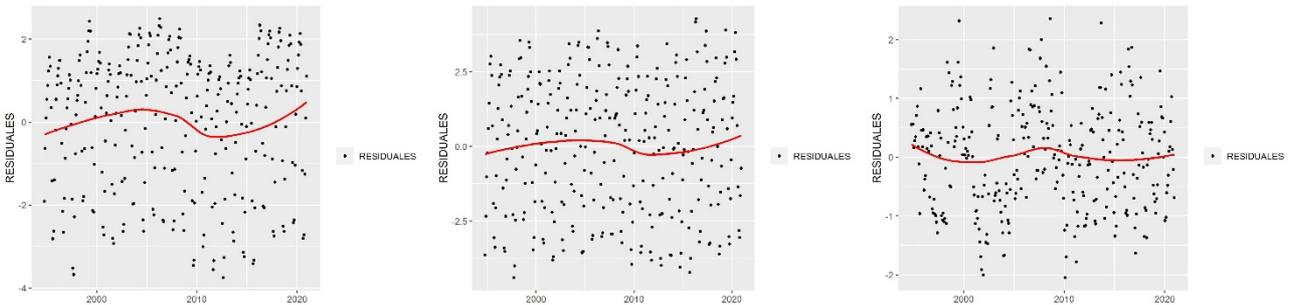


Figura 6. Análisis de residuales. Izquierda corresponde a los datos globales. Al centro son del Observatorio Mauna Loa y a la derecha la estación VAG Ushuaia.

4.1.4 Ajuste LOESS (TECNICA DE SUAVIZADO NO PARAMÉTRICO)

Cuando tenemos por objetivo el desplegar un patrón para encontrar otro o cualquier patrón subyacente, no debemos limitarnos a los ajustes paramétricos, que imponen un modelo matemático a nuestros datos y, en cambio, explorar técnicas de suavizado no paramétrico que no imponen ninguna estructura a los datos en absoluto. Un ejemplo de tal técnica de suavizado es el **ajuste Loess** (Figura 7).

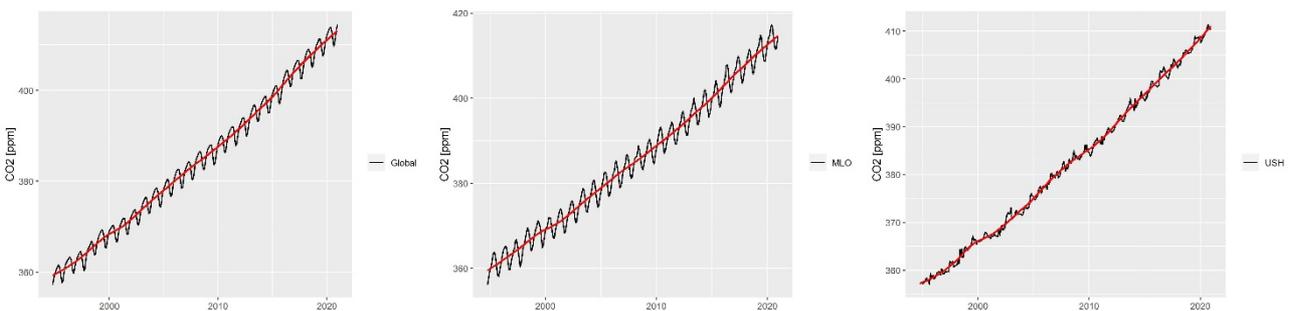


Figura 7. Incremento de CO₂ desde octubre del 1994 a diciembre del 2000. a) a la izquierda es el global, al centro es el Observatorio Mauna Loa (MLO) y a la izquierda la Estación VAG Ushuaia (USH).

A primera vista, se puede observar que no es muy diferente de nuestro modelo polinomial de segundo o tercer orden. Pero los residuos, para el cálculo de los residuos, sugieren que el Loess hizo un mejor trabajo al

eliminar cualquier patrón decenal en nuestros valores obtenidos de las mediciones de CO₂. Ya que no se observa una tendencia definida en la comparación de los tres sitios (Figura 8).

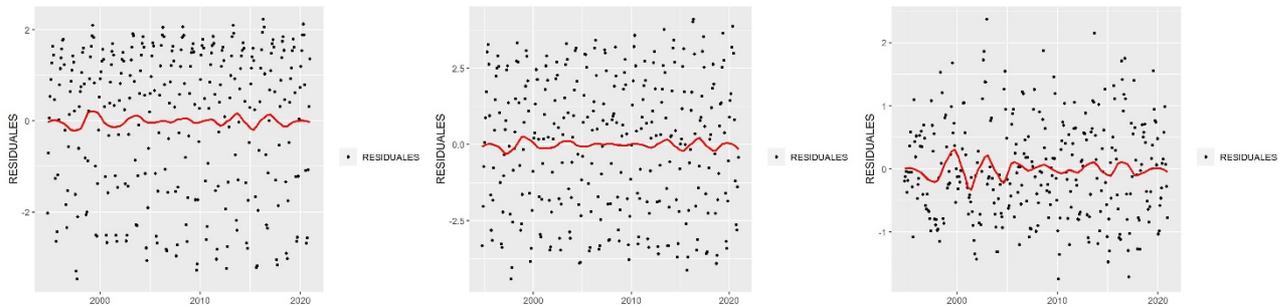


Figura 8. Análisis de residuales. Izquierda corresponde a los datos globales. Al centro son del Observatorio Mauna Loa y a la derecha la estación VAG Ushuaia.

Podemos continuar con los polinomios a modo de ensayos, pero agregáramos el componente cíclico, es decir una función que nos represente no solo la tendencia sino además la estacionalidad y para ello agregamos la función seno.

4.1.5 Polinomio de primer grado más la función SENO

A la función del polinomio de primer grado o lineal le vamos a sumar la función seno para representar no solo la tendencia sino modelar la estacionalidad, para después observar sus valores residuales y establecer si es una buena aproximación para usarla como tendencia. Se puede ver en la Figura 9 que la estacionalidad es bien representada, pero la tendencia no lo es para las tres series de datos, ya que los extremos mínimos y máximos, hay un desplazamiento que tiende a subestimar los datos de las mediciones de CO₂.

$$CO_2 \text{ (ppm)} = a_0 + a_1 * (\text{Año}) + \text{Seno}(2*\pi*\text{Año}) + \text{Cos}(2*\pi*\text{Año}) + \text{Seno}(4*\pi*\text{Año}) + \text{Cos}(4*\pi*\text{Año})$$

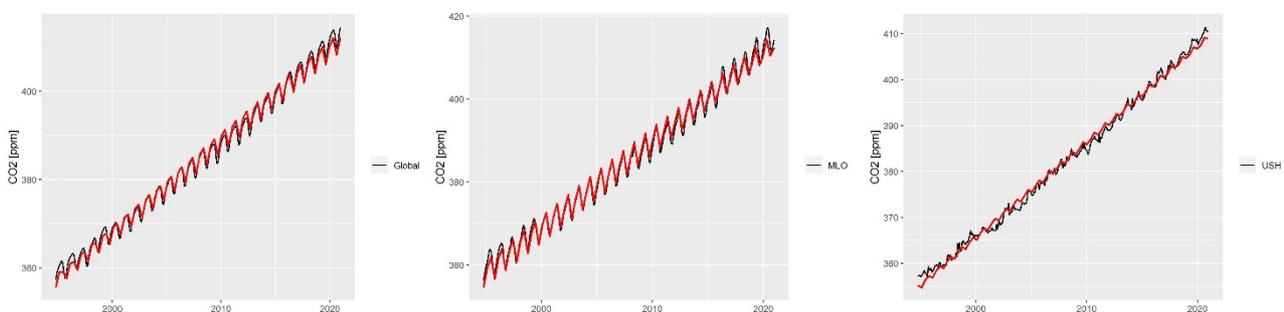


Figura 9. Incremento de CO₂ desde octubre del 1994 a diciembre del 2000. a) a la izquierda es el global, al centro es el Observatorio Mauna Loa (MLO) y a la izquierda la Estación VAG Ushuaia (USH).

Ahora calculamos los residuales y los resultados se presentan en la Figura 10.

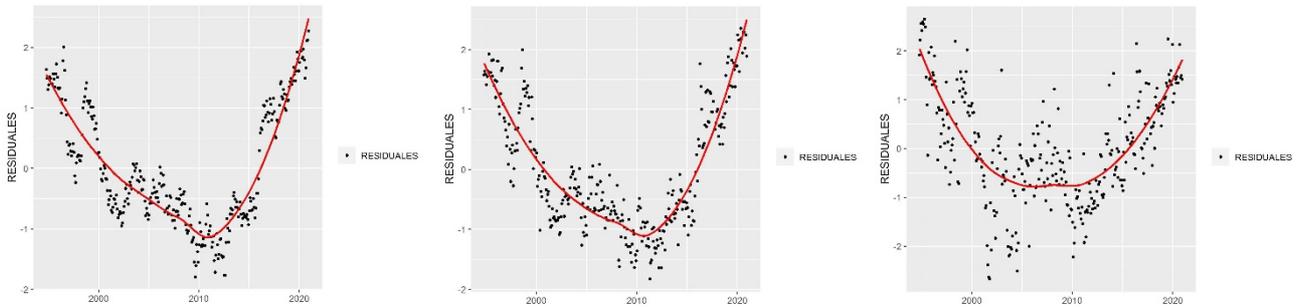


Figura 10. Análisis de residuales. Izquierda corresponde a los datos globales. Al centro son del Observatorio Mauna Loa y a la derecha la estación VAG Ushuaia.

Claramente los residuales se observa una tendencia tipo “V” para los datos de los datos globales y del observatorio Mauna Loa y una tendencia tipo “U” para la estación de Ushuaia. Por lo tanto, no es una buena aproximación para establecer como método de cálculo para la tendencia.

4.1.6 Polinomio de segundo grado más la función SENO

Finalmente, para abarcar un amplio margen de metodologías para establecer la tendencia más clara que representen las mediciones y valores de CO₂, se procede a usar un polinomio de segundo orden o cuadrático, más la función seno (Figura 11). Se observa que representa mejor la tendencia y la estacionalidad que en el polinomio de primer grado y la función seno.

$$CO_2 \text{ (ppm)} = a_0 + a_1 * (\text{Año}) + a_2 * (\text{Año}^2) + \text{Seno}(2*\pi*\text{Año}) + \text{Cos}(2*\pi*\text{Año}) + \text{Seno}(4*\pi*\text{Año}) + \text{Cos}(4*\pi*\text{Año})$$

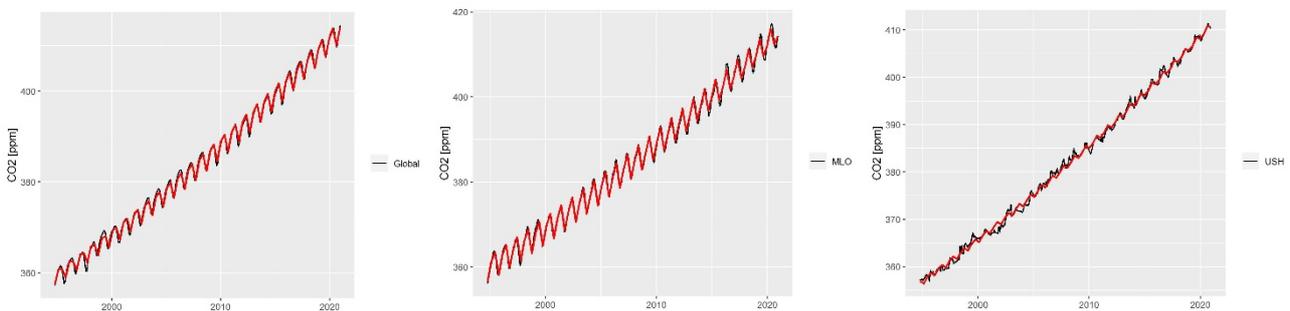


Figura 11. Incremento de CO₂ desde octubre del 1994 a diciembre del 2000. a) a la izquierda es el global, al centro es el Observatorio Mauna Loa (MLO) y a la izquierda la Estación VAG Ushuaia (USH).

Calculamos los residuales y observemos su comportamiento (Figura 12).

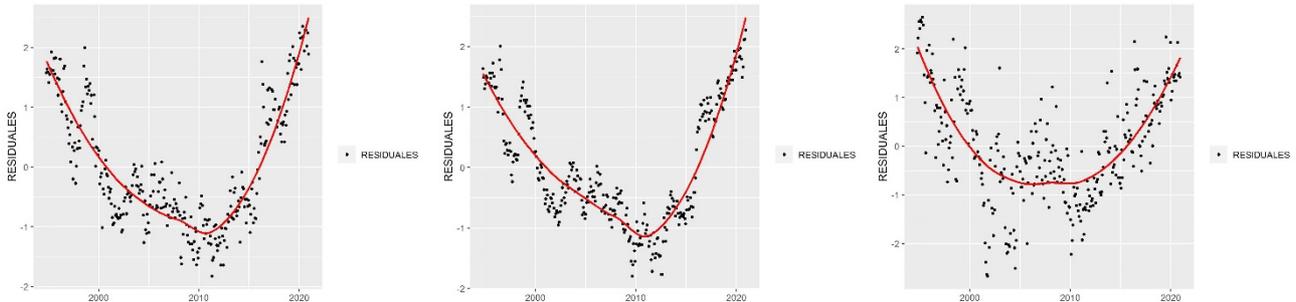


Figura 12. Análisis de residuales. Izquierda corresponde a los datos globales. Al centro son del Observatorio Mauna Loa y a la derecha la estación VAG Ushuaia.

Los residuales obtenidos son muy parecidos al polinomio de primer grado y la función seno. Para los datos de CO₂ globales y del observatorio Mauna Loa tiene una tendencia “V”, mientras que para los datos de la estación Ushuaia tiene una tendencia tipo “U”. Por lo tanto, no hay una buena representación por este método.

4.2 Tendencia

Seis diferentes metodologías de evaluación de ajuste y tendencia se han analizado para un periodo de tiempo que va desde octubre de 1994 al 2020 (26 años) de datos de CO₂ con tres diferentes series de datos, globales, del observatorio Mauna Loa y la estación de Ushuaia, haciendo evidente que la mejor opción para realizar el ajuste de los datos de CO₂ e inclusive poder modelar la curva, es el ajuste no paramétrico, mejor llamado LOESS suavizado. Pero LOESS no reproduce el cambio de CO₂ a determinado intervalo de tiempo, es decir el cambio de CO₂ que se produce año con año. En este sentido y con fines de cuantificar esa tendencia, hacemos un comparativo con las metodologías paramétricas, con el fin de observar a través de la correlación, cuál sería la que tiene mejor desempeño (Tabla 1).

Tabla 1. Correlación para cada estación y la metodología que se usa para obtener el mejor ajuste a los datos de CO₂. **MLO** es el observatorio Mauna Loa y **USH** es la estación de Ushuaia.

	Global		MLO		USH	
	R ² - Múltiple	R ² - Ajustada	R ² - Múltiple	R ² - Ajustada	R ² - Múltiple	R ² - Ajustada
Polinomial 1er Orden	0,9864	0,9864	0,9781	0,9780	0,9942	0,9942
Polinomial 2do Orden	0,9893	0,9892	0,9810	0,9809	0,9969	0,9969
Polinomial 3er Orden	0,9896	0,9895	0,9810	0,9809	0,9969	0,9969
Polinomial 1er Orden + Seno	0,9958	0,9958	0,9961	0,9961	0,9951	0,9950
Polinomial 2do Orden + Seno	0,9958	0,9958	0,9961	0,9961	0,9951	0,9950

Después de analizar las correlaciones, notamos que todas tienen una alta correlación, inclusive la lineal. Las más altas correlaciones son las polinomiales de primer y segundo orden más la función seno. Además de la mejor correlación, puede describir la estacionalidad de los 26 años de medición de CO₂ de los tres sitios.

Es muy importante mencionar que, al aplicar los 6 métodos de ajuste a las series completas de los datos globales, de enero de 1980 a diciembre del 2020 (40 años) y a los datos del observatorio Mauna Loa de marzo de 1959 a diciembre del 2020 (~60 años) estos no tienen una buena representación del ajuste. De tal manera que se procede a presentar las gráficas con las series completas con las metodologías aplicadas a los datos globales y del observatorio Mauna Loa. En la figura 13 se presentan los datos globales de CO₂.

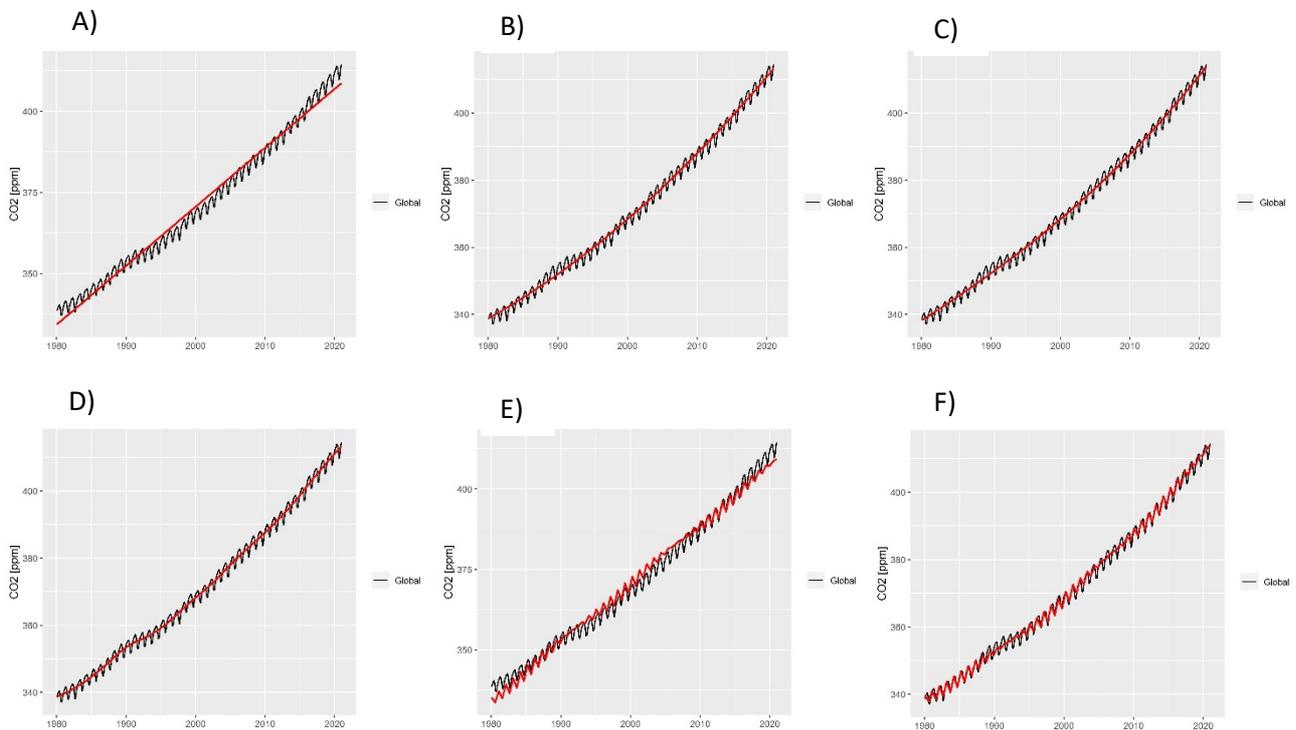


Figura 13. Metodologías de ajuste a las series completas de los datos globales (GL) de CO₂. La línea negra son los datos CO₂, la línea roja es la curva de ajuste. A) Ajuste lineal, B) Ajuste Polinomial de 2do Orden, C) Ajuste Polinomial de 3er Orden, E) Ajuste polinomial de 1er + la función seno, y F) Polinomio de 2do orden + la función seno.

Los datos de CO₂ en su serie completa, presentan un pequeño desplazamiento a partir, aproximadamente del año 1992. Este desplazamiento produce que algunos ajustes no sean capaces de reproducirlo, tal es el caso de polinomio de 1er grado o lineal, los polinomiales de 1er y 2do orden más la función seno.

Ahora, aplicamos el análisis de los residuos ($CO_2 - CO_{2corr}$) y los calculamos para cada uno de los ajustes, los resultados se pueden observar en la Figura 14. Recordando que lo que buscamos en los residuales es que no se aprecie una tendencia definida para ello ajustamos dichos residuales con LOESS suave.

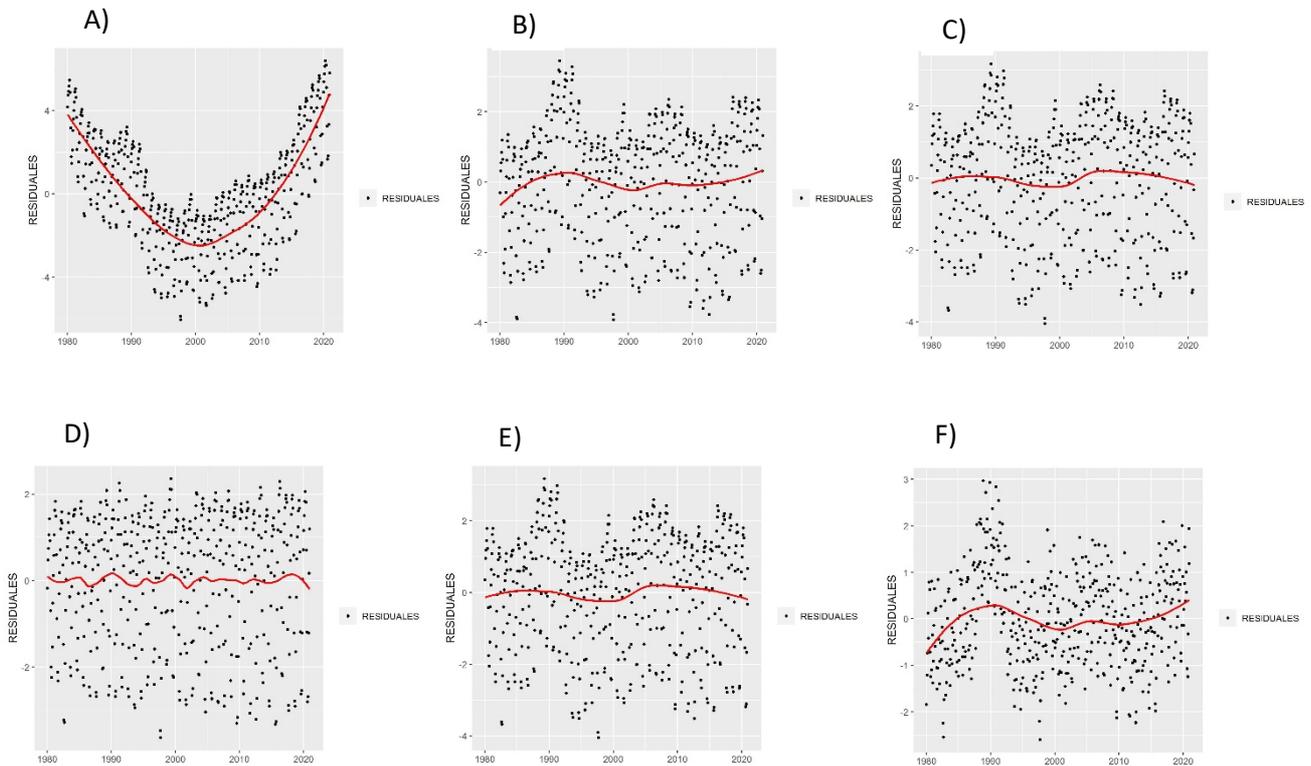


Figura 14. Residuales de los ajustes realizados a la serie de datos globales de CO_2 . La línea negra son los residuales CO_2 , la línea roja es la curva de ajuste. A) Ajuste lineal, B) Ajuste Polinomial de 2do Orden, C) Ajuste Polinomial de 3er Orden, E) Ajuste polinomial de 1er + la función seno, y F) Polinomio de 2do orden + la función seno.

La Figura 14-A, muestra que, los residuales que se obtuvieron a partir del ajuste lineal, tienen una tendencia tipo “V” lo que nos indica que no es buen ajuste.

Las Figuras 14-B y 14-C, son muy similares, ya que en ambos se alcanza a distinguir una forma definida en “N” por lo que tampoco sería un ajuste que estamos buscando.

La figura 14-D, es el ajuste con LOASS suave, y notamos que no existe una tendencia definida, que es el criterio que al inicio definimos y buscamos, por lo tanto, consideramos que es un buen ajuste a los datos de CO_2 globales.

La figura 14-E, se observa una tendencia tipo “M” por lo cual no consideramos que sea un buen ajuste. Consistente con el gráfico 13-E, donde se ve claramente que no es buen ajuste.

La Figura 14-F, se observa una tendencia tipo “N” que tampoco estamos buscando para la elección de un ajuste de los CO_2 globales.

En la Figura 15 se realiza el análisis de los 6 métodos de ajuste para los datos de CO₂ del Observatorio Mauna (MLO), que es la serie más larga que se tiene registrado en todo el mundo, el periodo es de marzo de 1958 a diciembre del 2020 (~60 años).

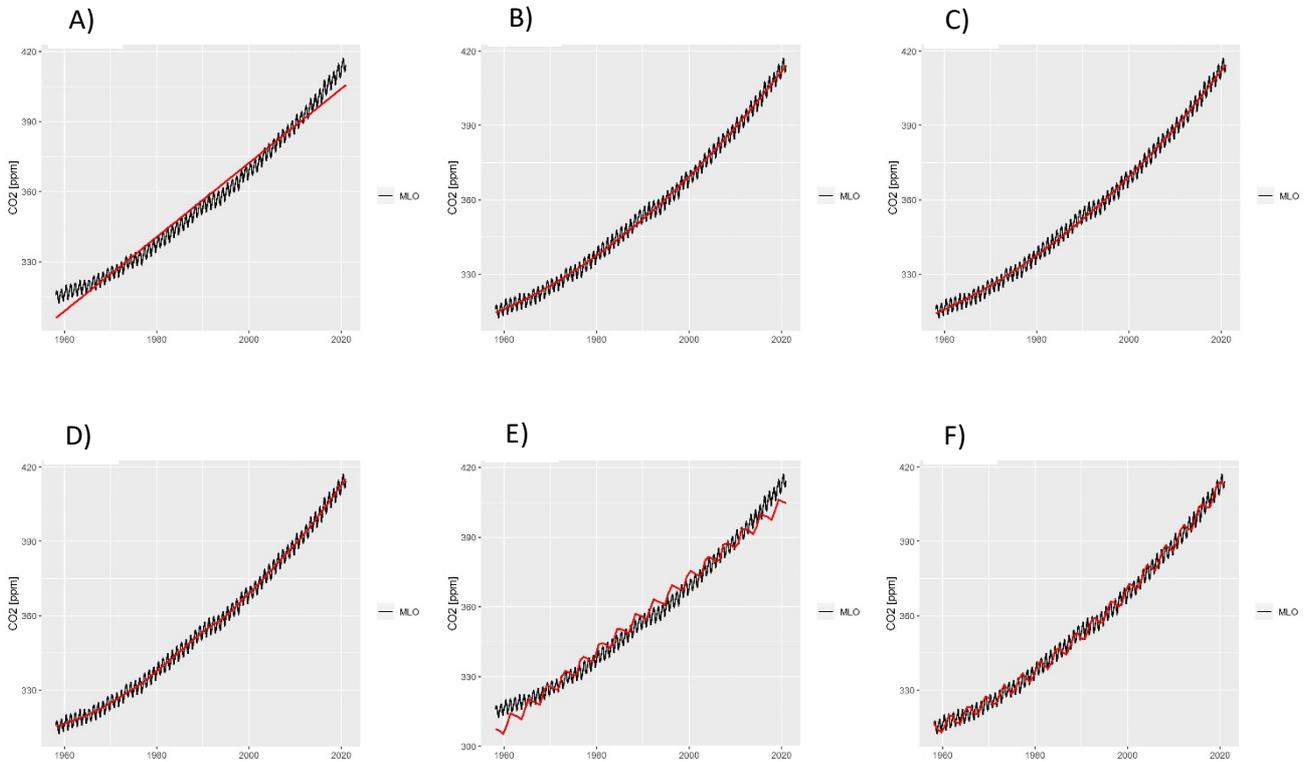


Figura 15. Metodologías de ajuste a las series completas de los datos Mauna Loa (MLO) de CO₂. La línea negra son los datos CO₂, la línea roja es la curva de ajuste. A) Ajuste lineal, B) Ajuste Polinomial de 2do Orden, C) Ajuste Polinomial de 3er Orden, E) Ajuste de un polinomio de 1er orden + la función seno, F) Ajuste de un polinomio de 2do orden + función seno.

Observando la Figura 15, a primera vista e intuitivamente, se nota que el polinomio de 1er orden o lineal, así como los polinomios de 1er y 2do orden + la función seno, no describen y no ajustan correctamente la serie histórica de CO₂ del Observatorio Muna Loa. Mientras que la metodología de los polinomios de 1er y 2do orden, así como LOASS suavizado, describen bien los datos analizados.

Es de llamar la atención que las funciones polinomiales 1er y 2do orden más la función seno, cada vez más deja de ajustar los datos de CO₂ conforme la serie de tiempo va creciendo, también deja de describir la parte estacional.

Ahora, aplicamos el análisis de los residuos (CO₂ – CO₂corr) y calculamos para cada uno de los ajustes, los resultados se pueden observar en la Figura 16. Recordando que lo que buscamos en los residuales es que no se aprecie una tendencia definida y para ello ajustamos dichos residuales con LOESS suave.

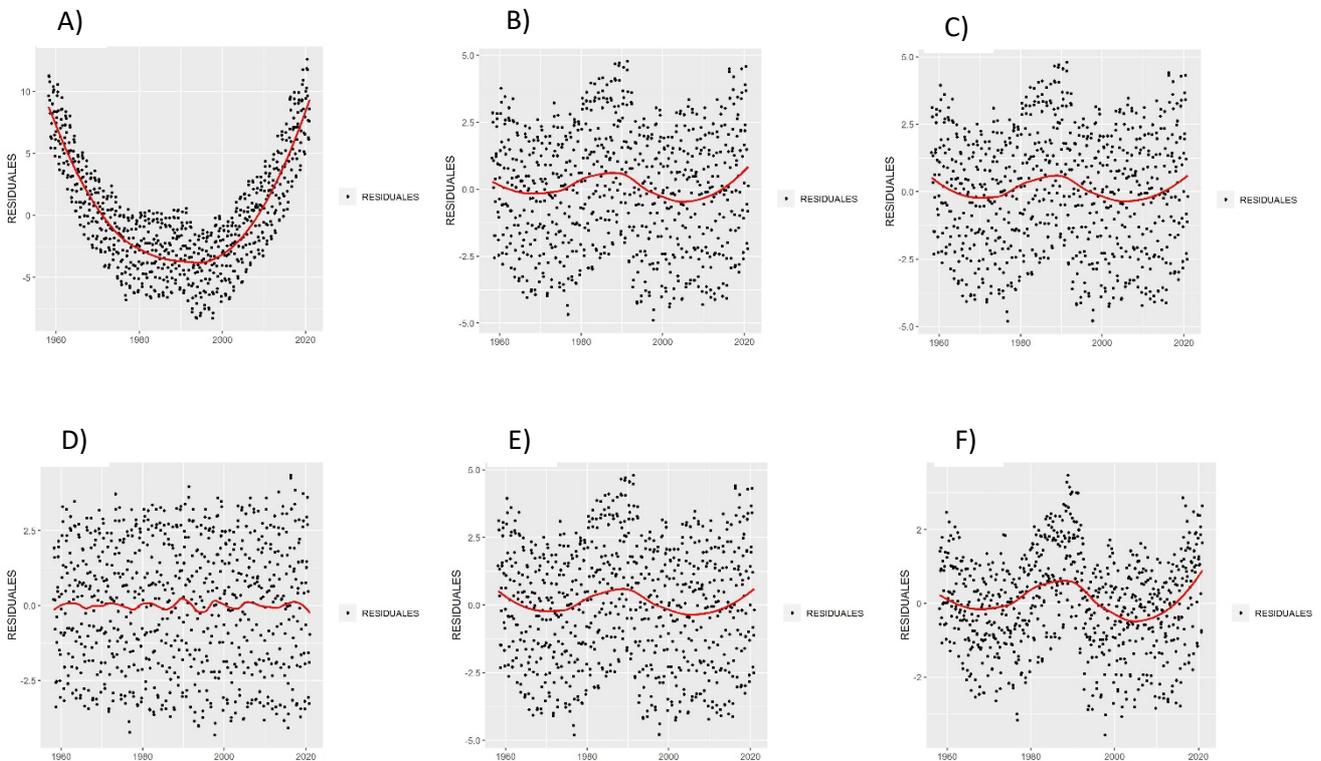


Figura 16. Residuales de los ajustes realizados a la serie de datos globales de CO₂. La línea negra son los residuales CO₂, la línea roja es la curva de ajuste. A) Ajuste lineal, B) Ajuste Polinomial de 2do Orden, C) Ajuste Polinomial de 3er Orden, E) Ajuste polinomial de 1er + la función seno, y F) Polinomio de 2do orden + la función seno.

En la Figura 16-A se observa que los residuales que se obtuvieron al realizar el ajuste lineal, una tendencia tipo “V” lo cual nos confirma nuevamente que, no es un buen método para ajustar los valores de CO₂ del observatorio Muna Loa.

En la Figura 16-B y 16-C, claramente se aprecia en los residuales de los polinomios de 2do y 3er orden, una tendencia en los residuales de tipo “W”, de tal manera que no es lo que buscamos para de elegir un buen ajuste.

En la Figura 16-D se aprecia que los residuales no tiene una tendencia, que es lo que nosotros necesitamos para definir el ajuste que requerimos.

En las Figuras 16-E y 16-F, la tendencia de los residuales de los polinomios de 1er y 2do orden + la función seno, es tipo “W” muy similar a la de los polinomios de 2do y 3er orden. Por lo tanto, esta situación nos confirma que la línea de ajuste en la figura 15-E y 15-F, no es buena y en todo caso es la peor de todos los ajustes realizados.

Finalmente, se realiza el análisis a través de las correlaciones, las cuales se presentan en la Tabla 2. Se toma la serie total del CO₂ global (40 años) y del observatorio Mauna Loa (~60 años).

Tabla 2. Correlación para cada estación y la metodología que se usa para obtener el mejor ajuste a los datos de CO₂ y MLO es el observatorio Mauna Loa.

	Global		MLO	
	R ² - Múltiple	R ² - Ajustada	R ² - Múltiple	R ² - Ajustada
Polinomial 1er Orden	0.9855	0.9855	0.9770	0.9770
Polinomial 2do Orden	0.9942	0.9942	0.9942	0.9942
Polinomial 3er Orden	0.9943	0.9943	0.9942	0.9942
Polinomial 1er Orden + Seno	0.9943	0.9943	0.9942	0.9942
Polinomial 2do Orden + Seno	0.9977	0.9977	0.9980	0.9980

Todas las correlaciones dan valores muy buenos para ajustar y modelar los datos de CO₂ en ambas series de tiempo. Pero el polinomio de 1er grado o lineal, es el que más bajo valor tiene, pero en su forma se ha mostrado que no tiene buena representación.

Después, la correlación de los polinomios de 3er orden son los que mejor valor dan, aunque los polinomios de 2do orden también ofrecen una muy buena correlación. De hecho, la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) usan un polinomio de segundo grado.

La mejor correlación en ambos casos se observa en los polinomios de 2do orden más la función seno, aunque se ha mostrado que no representa bien el ajuste, de tal manera que la parte del polinomio tiene un mayor peso preponderante que la función seno en la correlación de los datos.

5. CONCLUSIONES

Como primer paso se evalúan 3 series de tiempo de CO₂ en la atmósfera, obtenidos de mediciones globales, del Observatorio Mauna Loa y la Estación de Ushuaia. En las tres series se tomó como inicio, octubre del 1994 (26 años), que es la fecha que refiere al inicio de mediciones en la Estación VAG Ushuaia.

Después de realizar y aplicar 6 metodologías para obtener el mejor ajuste en 3 sitios de medición de CO₂, hemos encontrado que el mejor ajuste según el análisis de residuales (sin tendencia), es el método no paramétrico de ajuste LOESS suave.

Al realizar un análisis por correlación de los tres sitios de medición (26 años), encontramos que el mejor ajuste es el que proporciona el polinomio de 2do grado más la función seno, que además tiene la ventaja de reproducir la estacionalidad.

Cuando aplicamos las metodologías de ajuste a las series de tiempo completas de las mediciones CO₂ globales y del observatorio Mauna Loa, de 40 y 60 años respectivamente, encontramos que en la serie hay un cambio tipo escalera hacia el año 1992 y posteriormente la curva se vuelve tipo exponencial, tanto en las mediciones globales como en Mauna Loa. El polinomio de 1er grado o lineal, no ajusta adecuadamente, según el análisis de sus residuales, donde se observa una tendencia, que no es deseable para elegir como un buen método de ajuste. Los polinomios de 2do y 3er grado, también presentan una tendencia, muy similares entre ellos, por lo tanto, continuamos con el método de ajuste LOESS suave que, según sus residuales, presenta la mejor opción para describir los datos. Finalmente, los polinomios de 1er y 2do orden más la función seno, no pueden describir dichos cambios y se pierde inclusive la estacionalidad.

Para estas dos series completas, se hace un análisis de correlación, siendo el mejor la función polinomial de 2do grado + la función seno, el que mejor valor tiene, aunque en las graficas de ajuste, no lo es. Posteriormente, las funciones polinomiales de 2do y 3er orden, ofrecen una muy buena correlación y buen ajuste de la curva de CO₂, inclusive es que actualmente es usado por la NOAA, finalmente el método de más baja correlación es la función lineal.

Después de todo el análisis encontramos que para la estación VAG Ushuaia, podemos usar el método de ajuste LOESS suave, después de comprobar el análisis de sus residuales y para calcular la tendencia o el cambio de CO₂ a lo largo de tiempo es el polinomio de 2do o el de 3er Orden.

Es importante mencionar que las correlaciones en período relativamente cortos (26 años), son los polinomios de 2do orden más la función seno, los que mejor ajusta, inclusive describen la estacionalidad, pero al someterlos a series de tiempo largas y con algunos cambios en la tendencia de los datos CO₂, estos ya no son buenas opciones para el ajuste de las series de tiempo.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a “Manny” Gimond por la iniciativa: <https://mgimond.github.io/ES218/Week10a.html>.

Se agradece a la NOAA/EEUU por la disponibilidad de los datos de las series de tiempo del CO₂, Globales y del Observatorio Mauna Loa: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/data.html>.

Se agradece a la NOAA/EEUU por el análisis de las muestras de aire que se toman en la Estación VAG de Ushuaia, Argentina.

7. REFERENCIAS

Conway, T.J., P.P. Tans, L.S. Waterman, K.W. Thoning, D.R. Kitzis, K.A. Masarie, and N. Zhang, 1994: Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the NOAA/CMDL global air sampling network, J. Geophys. Res., 99, 22831-22855.

Dlugokencky, E.J., L.P. Steele, P.M. Lang, and K.A. Masarie, 1994: The growth rate and distribution of atmospheric methane, J. Geophys. Res., 99, 17,021-17,043.

GLOBALVIEW-CO₂, 2010: Cooperative Atmospheric Data Integration Project - Carbon Dioxide. NOAA ESRL, Boulder, Colorado, 2010. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/globalview/co2/co2_intro.html.

Masarie, K.A. and P.P. Tans, 1995: Extension and Integration of Atmospheric Carbon Dioxide Data into a Globally Consistent Measurement Record, J. Geophys. Res., 100, 11593-11610.

Novelli, P.C., L.P. Steele, and P.P. Tans, 1992: Mixing ratios of carbon monoxide in the troposphere, J. Geophys. Res., 97, 20,731-20,750.

OMM, 2009: 14th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracers Measurement Techniques (Helsinki, Finland, 10-13 September 2007) WMO TD No. 1487, April 2009.

Tans, P. P., T. J. Conway and T. Nakazawa, 1989: Latitudinal distribution of the sources and sinks of atmospheric carbon dioxide derived from surface observations and atmospheric transport model, J. of Geophys. Res., 94., 5151-5172.

Thoning, K.W., P.P. Tans, and W.D. Komhyr, 1989: Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory, 2. Analysis of the NOAA/GMCC data, 1974-1985., J. Geophys. Res., 94, 8549-8565.

Trolier, M., J.W.C. White, P.P. Tans, K.A. Masarie and P.A. Gemery, 1996: Monitoring the isotopic composition of atmospheric CO₂: measurements from the NOAA Global Air Sampling Network, J. Geophys. Res., 101, 25897-25916.

Tsutsumi, Y., M. Kazumasa, H. Takatoshi, I. Masaaki and T.J. Conway, 2009: Technical Report of Global Analysis Method for Major Greenhouse Gases by the World Data Center for Greenhouse Gases, WMO TD No. 1473, June 2009.

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gov.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gov.ar) o Martín Rugna (mrugna@smn.gov.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gov.ar).