

Universidad Técnica Federico Santa María
Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Valparaíso-Chile



“Efecto del fenómeno de El Niño en la concentración de ozono troposférico en Santiago de Chile”

Nicol Andrea López Wastavino

Memoria de grado para optar al título de Ingeniero Civil Ambiental

Profesor guía:
Dra. María Paz Domínguez.

Valparaíso
2017

RESUMEN

Santiago de Chile, es una ciudad que posee una elevada tasa de urbanización e industrialización, factores que, sumados a sus condiciones geográficas y climáticas, han provocado un progresivo aumento de la contaminación atmosférica. Estos problemas y la continua presión mediática hicieron que en el año 1996 fuera declarada como zona saturada en material particulado, monóxido de carbono y ozono, y zona latente en óxidos de nitrógeno. A partir de la declaración, se elaboró el primer Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (1998). Desde esa fecha, se han desarrollado una serie de investigaciones que han determinado la movilidad y comportamiento de los contaminantes en la cuenca, en particular, el ozono se encuentra mayormente concentrado en el sector oriente de la región afectando principalmente a la comuna de Las Condes. Contaminante secundario generado por la reacción de NO_x y COVs con la luz. Su formación y transporte se encuentran relacionados con los factores meteorológicos, por lo que anomalías climáticas como el fenómeno de El Niño podrían afectar su formación y distribución.

Este estudio analiza la influencia del fenómeno de El Niño en las concentraciones de ozono troposférico de Santiago. Para ello se seleccionaron comunas que tuvieran elevados niveles de ozono, se ubicaran en el pie de monte de la cuenca y fueran parte de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire, lugar desde el cual se obtuvieron los registros horarios de ozono. Los datos se procesaron para años con y sin presencia del fenómeno de El Niño, por separado, y considerando periodos característicos en la formación de ozono. Los resultados obtenidos, fueron graficados según la comuna y el periodo de estudio, para el análisis se compararon las medias obtenidas para años neutros y de El Niño, con el fin de determinar si existían diferencias significativas entre los valores obtenidos. Adicionalmente, se determinó si existía relación entre la concentración de ozono con la temperatura, y la concentración NO_x . A partir de los resultados se determinó que ninguna de las tres comunas estudiadas, presentó diferencias significativas entre las medias de ozono obtenidas para años neutros con las de años de El Niño. Un resultado similar se obtuvo al comparar durante meses característicos, en particular, la comuna de Las Condes fue la que presentó una mayor probabilidad de similitud en las medias ($p > 0,93$), seguida por La Florida ($p > 0,28$) y Puente Alto ($p > 0,20$). Al realizar el análisis mensual, por tipo de fenómeno, se obtuvo que El Niño Canónico y Modoki no presentan diferencias importantes con los años neutros en la comuna de Las Condes y La Florida. Del estudio horario, se determinó que los máximos de ozono se presentaban principalmente a las 12 horas y que en ninguna de las comunas existen diferencias significativas entre los años con y sin presencia de El Niño. Por otra parte, se corroboró la relación lineal positiva y casi perfecta entre el ozono con la temperatura ($R > 0,949$) y la correlación negativa con las concentraciones de óxidos de nitrógeno ($R < -0,944$).

Como complemento al análisis, se propone evaluar la influencia de factores como la variabilidad de la concentración de ozono con respecto a los cambios en la dirección del viento al interior de la cuenca, la humedad relativa y el efecto del fenómeno de El Niño con respecto a su intensidad.

ABSTRACT

Santiago, Chile, is a city that has a high rate of urbanization and industrialization, factors that, together with its geographic and climatic conditions, have caused a progressive increase in air pollution. These problems and the continuous media pressure caused that in the year 1996 was declared as zone saturated in particulate material, carbon monoxide and ozone, and zone latent in oxides of nitrogen. From the declaration, the first Prevention and Atmospheric Decontamination Plan (1998) was elaborated. Since that date, a series of investigations have been developed that have determined the mobility and behavior of pollutants in the basin, in particular, ozone is mainly concentrated in the eastern sector of the region affecting mainly the commune of Las Condes. Secondary pollutant generated by the reaction of NO_x and VOCs with light. Its formation and transport are related to the meteorological factors, reason why climatic anomalies like the El Niño phenomenon could affect its formation and distribution.

This study analyzes the influence of the El Niño phenomenon on tropospheric ozone concentrations in Santiago. To this end, communes with high levels of ozone were selected, located at the foot of the basin of the basin and part of the Air Quality Monitoring Network, from which the hourly ozone records were obtained. The data were processed for years with and without the presence of El Niño phenomenon, separately, and considering periods characteristic in the formation of ozone. The results obtained were plotted according to the commune and the study period. For the analysis, the means obtained for neutral and El Niño years were compared, in order to determine if there were significant differences between the values obtained. Additionally, it was determined whether there was a relationship between the ozone concentration and the temperature, and the NO_x concentration. From the results, it was determined that none of the three communes studied showed significant differences between the mean values of ozone obtained for years neutral to those of El Niño years. A similar result was obtained when comparing during characteristic months, in particular, Las Condes commune was the one that presented a greater likelihood of similarity in the means ($p > 0.93$), followed by La Florida ($p > 0.28$) And High Bridge ($p > 0.20$). When performing the monthly analysis, by type of phenomenon, it was obtained that the Canochian Boy and Modoki do not present important differences with the neutral years in the commune of Las Condes and La Florida. From the time study, it was determined that the ozone maxima were mainly present at 12 o'clock and that in any of the communes there are no significant differences between the years with and without El Niño. On the other hand, the positive and near perfect linear relationship between ozone and temperature ($R > 0.949$) and negative correlation with nitrogen oxides concentrations ($R < -0.944$) were corroborated.

As a complement to the analysis, it is proposed to evaluate the influence of factors such as the variability of the ozone concentration with respect to the changes in the direction of the wind to the interior of the basin, the relative humidity and the effect of the El Niño phenomenon with respect to Its intensity

Índice

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
Índice	4
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	9
Capítulo 1. Introducción y Objetivos.....	10
1.1 Introducción.....	10
1.2 Objetivos.....	10
1.2.1. Objetivo General	10
1.2.2. Objetivos Específicos	11
Capítulo 2. Marco teórico.....	12
2.1. El Fenómeno de El Niño.....	12
2.1.1. Características.....	12
2.1.2. Efectos del Fenómeno de El Niño.....	17
2.2. Santiago de Chile.....	23
2.2.1. Características Geográficas.....	24
2.2.2. Características Climáticas.....	24
2.2.3. Contaminación Atmosférica.....	26
2.2.4. Políticas de calidad de aire.....	28
2.3. Formación de ozono troposférico.....	30
2.4. Comentarios Finales	35
Capítulo 3. Materiales y Método.....	36
3.1. Materiales.....	36
3.1.1 Área de Estudio.....	36
3.1.2. Calidad del Aire en Santiago.....	37
3.1.3. Datos Meteorológicos.....	38
3.2. Método.....	39
3.2.1. Determinación de los periodos de estudio.....	39
3.2.2. Análisis de los datos.....	40

3.2.3.	Comparación y contraste de los resultados.....	41
Capítulo 4.	Resultados y Discusión.....	43
4.1	Años con y sin presencia de El Niño.....	43
4.2	Periodos Característicos.	44
4.3	Promedios de Concentración de Ozono por Comuna.	46
4.3.1.	Comparación entre comunas.....	46
4.3.2.	Promedio de Concentraciones en Meses Característicos.	48
4.3.3.	Promedios de Concentraciones en Horas Características.....	56
4.3.4.	Concentraciones de NO _x	67
4.3.5.	Influencia de las precipitaciones.....	68
Capítulo 5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	69
5.1.	Conclusiones.	69
5.2.	Recomendaciones	69
Capítulo 6.	Referencias.....	71
Anexos.....		75
1.1.	Periodos con presencia de El Niño.....	75
1.2.	Horas Características.....	76
1.2.1.	Promedios de Temperaturas desde 1997 al 2015.....	76
1.2.2.	Promedios Anuales de Ozono.....	76
1.2.3.	Promedio Mensual de Precipitaciones	77
1.2.4.	Concentraciones de Ozono en Horas Características Con o Sin El Niño	78
1.2.5.	Promedio de Concentraciones de NO _x Con o Sin El Niño.....	81
1.2.6.	Coeficientes de Correlación (R)	82

Índice de Figuras

Figura 1, Vientos Alisios, en condiciones normales de circulación atmosférica.	12
Figura 2, Ubicación de Tahití y Darwin, posiciones utilizadas para el cálculo de IOS.	13
Figura 3, Regiones del Pacífico en que se realiza el seguimiento de la TSM.	14
Figura 4, Celda de Walker en condiciones de El Niño.	15
Figura 5, Temperatura Anómalas en la superficie del Mar en Periodos de El Niño Canónico.	16
Figura 6, Temperatura Anómalas en la superficie del Mar en Periodos de El Niño Modoki.	16
Figura 7, Celda de Walker en condiciones normales.	18
Figura 8, Celda de Walker en condiciones de El Niño.	19
Figura 9, Distribución vertical del ozono en la Atmósfera.	20
Figura 10, Esquema representativo de la circulación entre estratósfera y tropósfera.	21
Figura 11, Intercambio Tropósfera-Estratósfera y circulación de Brewer-Dobson.	22
Figura 12, Corte transversal de la Zona Central de Chile.	24
Figura 13, Celdas de Circulación Global.	25
Figura 14, a) Perfil térmico en condiciones normales b) Perfil térmico de inversión térmica	26
Figura 15, Crecimiento poblacional de Santiago de Chile.	28
Figura 16, Esquema que resume las reacciones en régimen de baja emisión de NO_x	32
Figura 17, Esquema que resume el régimen de emisión de NO_x intermedia.	33
Figura 18, Esquema resumen de régimen de alta emisión de NO_x	34
Figura 19, Concentraciones de ozono de las comunas pertenecientes a la red de calidad del aire.	36
Figura 20, Mapa de Santiago con las comunas ubicadas en el piedemonte.	36
Figura 21, Esquema de análisis de datos.	41
Figura 22, Ciclo de Radiación Anual, Ciudad de Santiago.	44
Figura 23, Meses con Radiación Solar Mayor a 6 kW/m^2	45
Figura 24, Ciclo Radiación Diario, Ciudad de Santiago.	45
Figura 25, Horas con radiación solar mayor a los 400 W/m^2	46
Figura 26, Concentraciones de Ozono promedio por comuna en años sin El Niño.	47

Figura 27, Concentraciones de Ozono en meses característicos por comuna, años con El Niño.	48
Figura 28, Comparación de meses característicos para años con y sin Niño, Las Condes....	49
Figura 29, Comparación de meses característicos para años con y sin Niño, La Florida.	50
Figura 30, Comparación de meses característicos para años con y sin Niño, Puente Alto... 51	
Figura 31, Comparación de años sin El Niño y años con El Niño por tipo, Las Condes.	53
Figura 32, Comparación de años sin El Niño y años con El Niño por tipo, La Florida.	54
Figura 33, Comparación de años sin El Niño y años con El Niño por tipo, Puente Alto.	54
Figura 34, Promedio de Horas Características, Mes de Noviembre.	57
Figura 35, Promedio de Horas Características, Mes de Diciembre.	57
Figura 36, Promedio de Horas Características, Mes de Enero.	58
Figura 37, Promedio de Horas Características, Mes de Febrero.	59
Figura 38, Promedio de Horas Características, Mes de Marzo.	59
Figura 39, Promedio de Horas Características, Mes de Noviembre La Florida.	60
Figura 40, Promedio de Horas Características, Mes de Diciembre La Florida.	61
Figura 41, Promedio de Horas Características, Mes de Enero La Florida.	62
Figura 42, Promedio de Horas Características, Mes de Febrero La Florida.	62
Figura 43, Promedio de Horas Características, Mes de Marzo La Florida.	63
Figura 44, Promedio de Horas Características, Mes de Noviembre Puente Alto.	64
Figura 45, Promedio de Horas Características, Mes de Diciembre Puente Alto.	64
Figura 46, Promedio de Horas Características, Mes de Enero Puente Alto.	65
Figura 47, Promedio de Horas Características, Mes de Febrero Puente Alto.	66
Figura 48, Promedio de Horas Características, Mes de Marzo Puente Alto.	66
Figura 49, Valores de ION superiores a 0,5°C, sector 3-4.	75
Figura 50, Fases negativas del IOS.	75
Figura 51, Temperaturas promedio de Santiago desde el año 1997 al 2015, para horas en específico.	76
Figura 52, Promedio Anual de Ozono por Comuna.	76
Figura 53, Promedios Mensuales de NO _x , Las Condes.	81
Figura 54, Promedios Mensuales de NO _x , La Florida.	81
Figura 55, Promedios Mensuales de NO _x , Puente Alto.	82

Figura 56, Correlación Lineal de la temperatura y las concentraciones de Ozono en Las Condes	82
Figura 57, Correlación Lineal de la temperatura y las concentraciones de Ozono en La Florida	83
Figura 58, Correlación Lineal de la temperatura y las concentraciones de Ozono en Puente Alto.....	83
Figura 59, Correlación Lineal entre las concentraciones de NO _x y las concentraciones de Ozono en Las Condes.....	84
Figura 60, Correlación Lineal entre las concentraciones de NO _x y las concentraciones de Ozono en La Florida.....	84
Figura 61, Correlación Lineal entre las concentraciones de NO _x y las concentraciones de Ozono en Puente Alto.....	85

Índice de Tablas

Tabla 1, Años en que se ha presentado el fenómeno de El Niño.....	17
Tabla 2, Límites normativos vigentes para calidad del aire.	29
Tabla 3, Intervalos de Coeficiente de correlación.....	42
Tabla 4, Intervalos de Coeficiente de determinación	42
Tabla 5, Periodos de El Niño, La Niña y Neutros.	43
Tabla 6, Periodo de desarrollo del fenómeno de El Niño por tipo.....	44
Tabla 7, Comparación entre meses los parámetros utilizados para el análisis, ordenando de mayor a menor.....	56
Tabla 8, Promedio de concentraciones de ozono de Las Condes, en horas características sin El Niño.	78
Tabla 9, Promedio de concentraciones de ozono de Las Condes, en horas características con El Niño.....	79
Tabla 10, Promedio de concentraciones de ozono de La Florida, en horas características sin El Niño.	79
Tabla 11, Promedio de concentraciones de ozono de La Florida, en horas características con El Niño.....	79
Tabla 12, Promedio de concentraciones de ozono de Puente Alto, en horas características sin El Niño	80
Tabla 13, Promedio de concentraciones de ozono de Puente Alto, en horas características sin El Niño.	80

Capítulo 1. Introducción y Objetivos.

1.1 Introducción.

El ozono es un componente natural de la atmósfera, se encuentra principalmente en la estratósfera lugar donde cumple el rol de filtrar la peligrosa radiación ultravioleta. No obstante, en la tropósfera es un contaminante cuya formación depende de la reacción fotoquímica de los óxidos de nitrógeno con la luz (Monks *et al.*, 2015; The Royal Society, 2008). Su síntesis es característica de urbes con alto nivel de industrialización, como es el caso de Santiago, ciudad que debido a sus características demográficas, geográficas y climáticas posee altos niveles de contaminación, la cual se encuentra principalmente compuesta por material particulado (MP), gases como dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), Ozono (O_3) y compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) (Romero y Vásquez, 2005; Muñoz, 1992; Rubio *et al.*, 2001). En el año 1996, producto del incremento en la contaminación, la región fue declarada como Zona Saturada en material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3) y Zona Latente en óxidos de nitrógeno (NO_x). A raíz de la situación, se elaboró el primer “Plan de Prevención y Descontaminación para la Región Metropolitana”, aprobado por el D.S. N°16 de 1998, el cual ha sido modificado en dos ocasiones y se encuentra en reevaluación desde el año 2015. Debido a que el ozono es un contaminante secundario, es importante investigar factores involucrados en su formación. En este estudio se analizará el efecto del fenómeno de El Niño sobre las concentraciones de ozono troposférico de la ciudad de Santiago. Para ello es necesario recopilar los registros de ozono de las comunas mayormente afectadas por el contaminante, con el fin de evaluar si existe alguna fluctuación de los valores en presencia del fenómeno de El Niño.

1.2 Objetivos.

1.2.1. Objetivo General

Identificar la relación entre la concentración de ozono troposférico, en Santiago de Chile, con la presencia del fenómeno de El Niño.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir las características del fenómeno de El Niño observado en Chile.
- Identificar los periodos en que se ha presentado el fenómeno de El Niño, en los últimos 18 años.
- Determinar las concentraciones de ozono troposférico en los últimos 18 años, en Santiago de Chile.
- Identificar, cuantificar y comparar las concentraciones de ozono troposférico en años con y sin presencia del fenómeno de El Niño.

Capítulo 2. Marco teórico.

2.1. El Fenómeno de El Niño.

El nombre del fenómeno, proviene de la “Corriente de El Niño”, calificativo con el cual pescadores del sur de Ecuador y norte del Perú identifican la presencia de un flujo de aguas cálidas, en dirección sur, durante el mes de diciembre (Zambrano, 1996). No obstante, el fenómeno de El Niño no es responsable de la aparición esta corriente (Trenberth, 1997; Zambrano, 1996).

2.1.1. Características.

El fenómeno de El Niño es causado por cambios en los vientos alisios sobre el océano Pacífico tropical (Figura 1). El origen de esta fluctuación fue estudiado por primera vez por Sir Gilbert Walker, quien analizó los cambios interanuales de las presiones sobre el Océano Indico y el Océano Pacífico Tropical Oriental, demostrando que estas se encontraban fuera de fase, es decir, cuando el campo de presión es alto en el Océano Pacífico, tiende a ser bajo en el Océano Indico. A esta variación irregular de las presiones se le denominó “Oscilación del Sur” (Brenes Rodríguez, 2014).

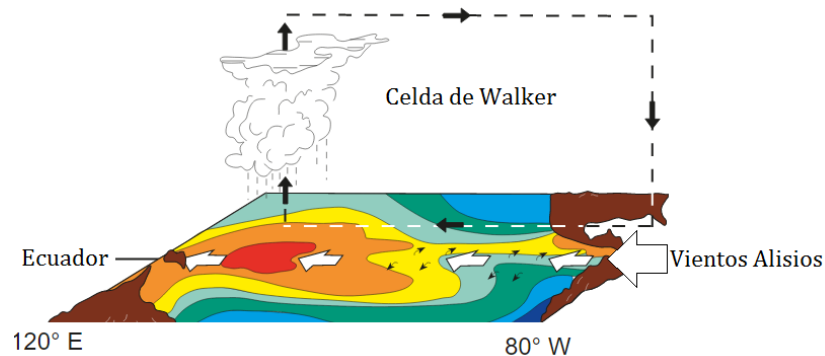


Figura 1, Vientos Alisios, en condiciones normales de circulación atmosférica.

Fuente: (Maturana *et al.*, 2004)

Debido a la estrecha relación entre el fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur, es que al fenómeno global se le denominó “El Niño Oscilación del Sur” (ENOS). Cabe destacar que el

ciclo del ENOS está conformado por etapas de El Niño, La Niña y condiciones neutras (Valiente, 1996; Rasmusson y Carpenter, 1982).

La Oscilación del Sur es una perturbación directa de las circulaciones térmicas de la atmósfera (La Circulación de Hadley y Circulación de Walker) y está relacionada con fluctuaciones en la intensidad y la posición de las regiones de ascenso de aire húmedo. El ascenso de las masas de aire es influenciado por los gradientes térmicos de la superficie del mar y de los continentes, por lo que están involucrados directamente en la alteración de la Oscilación del Sur, lo que se refleja en las variaciones del Índice de Oscilación del Sur (IOS), estándar que mide la diferencia normalizada de la presión atmosférica superficial entre Tahití y Darwin (Figura 2). Es utilizado constantemente para determinar el fortalecimiento de los vientos alisios (Maturana *et al.*, 2004; Brenes Rodriguez, 2014; NOAA, 2016).

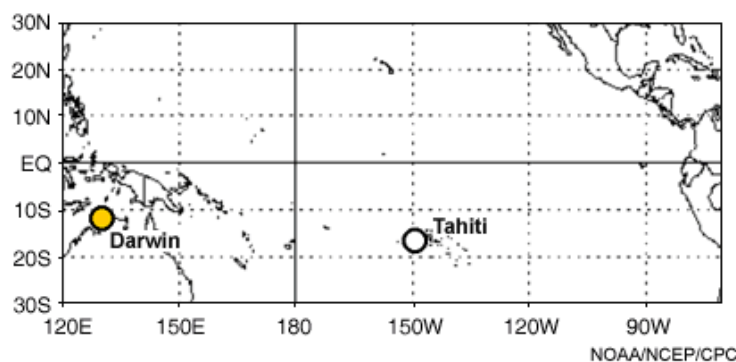


Figura 2, Ubicación de Tahití y Darwin, posiciones utilizadas para el cálculo de IOS.
Fuente: NOAA

Por lo tanto, el factor que detona la presencia del fenómeno de El Niño, es la temperatura superficial del mar (TSM) (Brenes Rodriguez, 2014), la que se manifiesta, principalmente, a través de un calentamiento o enfriamiento anómalo en el Pacífico Ecuatorial central y oriental (El Niño y La Niña respectivamente). Estas variaciones anómalas, de la TSM, son medidas a través del Índice Oceánico de El Niño (ION). Estándar que permite cuantificar, en ciertas zonas del océano Pacífico, las fluctuaciones en la temperatura superficial del mar. En la Figura 3 se presentan las regiones oceánicas utilizadas para el análisis del ION (NOAA, 2016; Brenes Rodriguez, 2014; Maturana *et al.*, 2004).

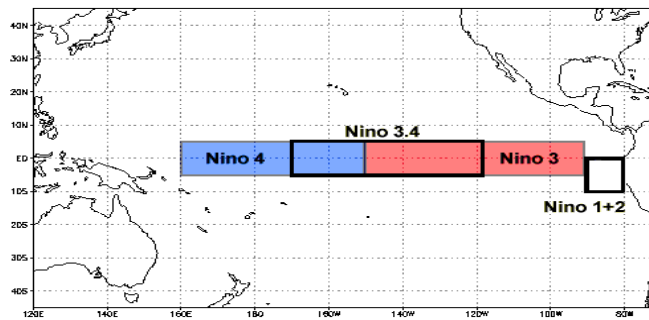


Figura 3, Regiones del Pacífico en que se realiza el seguimiento de la TSM.
Fuente: NOAA

- **Niño 1:** Zona de surgencia costera frente al Perú y Ecuador. Es una región extremadamente sensible a cambios en los procesos de interacción entre el océano y la atmósfera a nivel estacional y por supuesto ante la presencia de El Niño.
- **Niño 2:** Zona de las Islas Galápagos, región de transición entre el Pacífico Ecuatorial Central y Oriental.
- **Niño 3:** Ubicada en el Pacífico Ecuatorial Central. Región donde existe una señal fuerte de El Niño, pero no hay una buena sensibilidad a los cambios estacionales que ocurren en los diferentes procesos de interacción océano-atmósfera.
- **Niño 4:** Ubicada en una buena parte del Pacífico Ecuatorial Occidental, abarca la masa de agua cálida con las mayores temperaturas superficiales en el Pacífico.
- **Niño 3.4:** Comprende una parte de la zona Niño 3 y Niño 4.

En resumen, El Niño se caracteriza por presentar valores de ION positivos que superan los 0,5°C durante un mínimo de tres meses, en la zona Niño 3.4 (Brenes Rodriguez, 2014; Carrasco y Quintana, 2004; NOAA, 2016). A su vez, estos valores de ION coinciden con fases negativas del IOS, lo que implica que la presión de aire en Tahití es menor a lo normal mientras que en Darwin es mayor, como consecuencia los vientos alisios se debilitan (Zambrano, 1996; NOAA, 2016). Bajo estas condiciones la circulación de Walker se amortigua. Generando fuertes precipitaciones y cambios notables en el clima, tanto en los países del Pacífico sudoriental, como en otras partes del mundo (Figura 4) (Maturana *et al.*, 2004). En contraste, La Niña presenta características totalmente opuestas (ION negativos e IOS en fase positiva), por lo que sus efectos en las condiciones atmosféricas y oceánicas son totalmente opuestas a las presentadas en periodos de El Niño (Maturana *et al.*, 2004; NOAA, 2016).

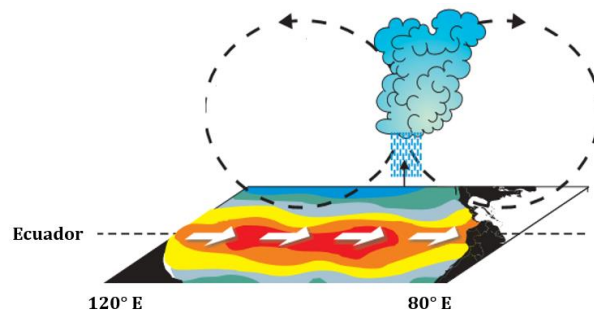


Figura 4, Celda de Walker en condiciones de El Niño.
Fuente: (Maturana *et al.*, 2004)

■ Tipos de fenómeno de El Niño

El Niño, presenta dos patrones recurrentes de calentamiento marino, el Canónico y el Modoki, los que se diferencian por la zona en que se genera el aumento de la temperatura en la superficie oceánica (Xie *et al.*, 2014).

El Niño canónico, o sólo El Niño, se caracteriza por presentar fuertes anomalías positivas de la temperatura superficial del mar que se extienden desde las Galápagos hasta alcanzar las costas de Sudamérica, entre los meses de enero a junio (Figura 5). El debilitamiento de los vientos alisios, en conjunto con otros cambios, generan un notorio aumento en las precipitaciones a lo largo de la costa de Ecuador, Perú y sobre el Pacífico Oriental, y con ello la sequía en el Pacífico occidental. Los cambios en las condiciones atmosféricas son abaladas por pronunciados descenso del IOS (Zambrano, 1996; Xie *et al.*, 2014).

Por otra parte, El Niño Modoki es un nuevo y cada vez más frecuente fenómeno océano-atmosférico. Su nombre proviene de una palabra japonesa que significa “una cosa similar pero diferente”, y se justifica en el hecho de que presenta alteraciones totalmente diferentes a las producidas por El Niño Canónico (Yamagata *et al.*, 2004). El desarrollo del fenómeno presenta un aumento en la TSM en el centro del océano Pacífico ecuatorial central, el que es flanqueado por temperaturas superficiales más frías en las costas oriental y occidental (Figura 6) (Xie *et al.*, 2014). Estos gradientes en la temperatura superficial del mar producen anomalías en la circulación de Walker, generando dos celdas sobre el Pacífico tropical, con una región húmeda (convectiva) en el Pacífico central (Weng *et al.*, 2007).

Debido a la variación en el patrón del fenómeno es que sus características cambian, esto se refleja en el escaso efecto de las temperaturas del agua, del aire y en las lluvias (Xie *et al.*, 2014; Takahashi *et al.*, 2011). Los cambios sobre el clima global, dependiendo de la temporada impacta a regiones como el Lejano Oriente, Japón, Nueva Zelanda y la costa occidental de Estados Unidos de manera totalmente opuesta al ENOS convencional (Ashok *et al.*, 2007; Yeh *et al.*, 2009).

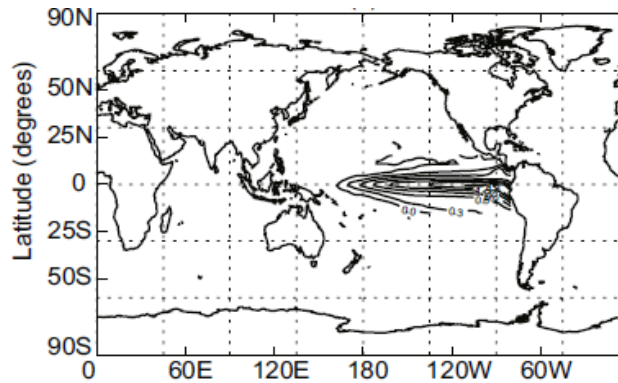


Figura 5, Temperatura Anómalas en la superficie del Mar en Periodos de El Niño Canónico.
Fuente: (Xie *et al.*, 2014).

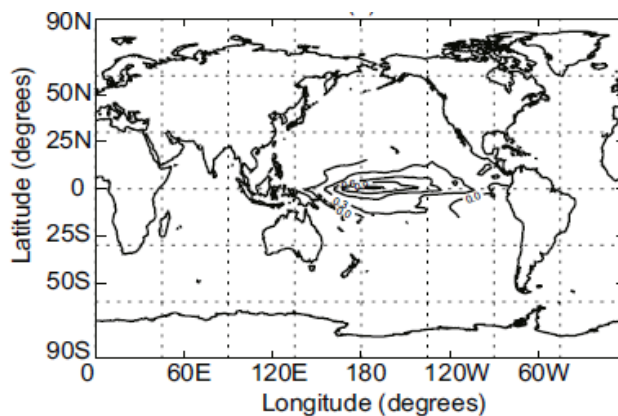


Figura 6, Temperatura Anómalas en la superficie del Mar en Periodos de El Niño Modoki.
Fuente: (Xie *et al.*, 2014).

El Niño Modoki tiene un trasfondo decadal, fenómeno conocido como la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), una fluctuación natural que alterna fases de calentamiento y de enfriamiento oceánico cada 20 o 30 años. Estudios indican que esta oscilación natural, determinaría la frecuencia e intensidad del fenómeno (Brenes Rodriguez, 2014). Mientras que El Niño Canónico predomina por la variabilidad interanual (Weng *et al.*, 2007).

- **Periodicidad del fenómeno de El Niño**

El ENOS se desarrolla en forma aperiódica en intervalos de entre 2 y 7 años, sin embargo, la mayoría de los eventos se separa por 3 o 4 años con una duración típica de 18 meses. La intensidad del fenómeno es variable, pero estimaciones han demostrado que eventos de intensidad fuerte y muy fuerte tienen una separación del orden de los 7 años. En la Tabla 1, se encuentran los periodos en que se ha presentado el fenómeno de El Niño, Canónico y Modoki (Quinn y Neal, 1987; Brenes Rodriguez, 2014; Maturana *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2014)

Tabla 1, Años en que se ha presentado el fenómeno de El Niño.
Fuente: (Xie *et al.*, 2014)

El Niño Canónico	El Niño Modoki
jul. 1982-ago. 1983	sep. 1990- dic. 1991
dic. 1986- ene. 1988	abr. 1994- jun. 1995
may. 1997- may. 1998	ene. 2002- abr. 2003
ago. 2006- ene. 2007	jun. 2004- dic. 2004
	oct. 2009- feb. 2010

2.1.2. Efectos del Fenómeno de El Niño.

- **Efectos sobre las condiciones atmosféricas.**

El fenómeno de El Niño genera una serie de alteraciones, como fluctuaciones en la presión atmosférica, la circulación de los vientos y los patrones de precipitaciones. Los ciclos normales de calentamiento y enfriamiento de la atmósfera, que se desarrollan en las zonas centro y este del Pacífico, coexisten con un cambio significativo de la presión atmosférica a nivel del mar, Oscilación del Sur. La evolución del fenómeno se aprecia cuando la variación de la presión atmosférica cambia hacia la fase negativa, es decir, se eleva la presión atmosférica en el oeste y disminuye en el este. Esta alternancia entre las fases positiva y negativa, contribuye a cambiar la intensidad de la circulación de los vientos alisios, los cuales se dirigen, en general, de este a oeste (Maturana *et al.*, 2004).

El comportamiento de los vientos alisios en la zona de la cuenca del Pacífico es esencial en el desarrollo y mantenimiento de El Niño (Carrasco y Quintana, 2004). Durante la etapa cálida del ENOS, los vientos alisios sufren un debilitamiento de la Intensidad, en el oeste y centro del Pacífico, y muchas veces invierten completamente su dirección. Como consecuencia, se genera ondas Kelvin y el desplazamiento y afloramiento de aguas más cálidas en el océano, lo que genera una disminución de la surgencia, hacia el sector oriental del Pacífico ecuatorial, facilitando la aparición de anomalías positivas en la TSM en el océano Pacífico del este y un aumento del nivel del mar en dicha zona (Carrasco y Quintana, 2004; Maturana *et al.*, 2004). El efecto de los vientos puede generar un cambio en la circulación de la Celda de Walker, la que se caracteriza por tener una rama ascendente, en zonas de baja presión, y una descendente, alta presión. En la región ascendente es donde se transfiere la máxima cantidad de energía desde el océano a la atmósfera; debido a la condensación de vapor de agua en conglomerados nubosos del tipo cumulonimbos. La rama descendente de esta celda se sitúa en el lado este del Pacífico, sobre aguas oceánicas más frías. Esta es una zona de altas presiones atmosféricas por lo que las precipitaciones son muy poco frecuentes en las costas del Perú y el norte de Chile.

Durante el desarrollo de El Niño, es posible que la poza cálida, en el lado oeste del Pacífico, se traslade hacia el centro y este del Pacífico. Como consecuencia de ello, la convección atmosférica asociada sigue la evolución de la temperatura del mar, modificándose la circulación de Walker sobre el ecuador (Figura 7 y 8) (Maturana *et al.*, 2004; Herrera, 2015).

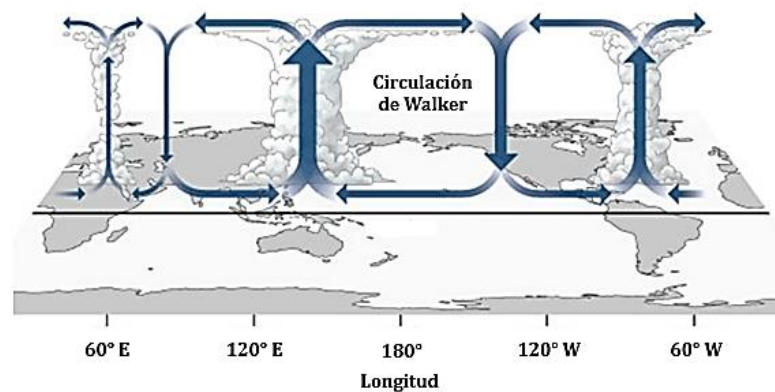


Figura 7, Celda de Walker en condiciones normales
Fuente: (Herrera, 2015)

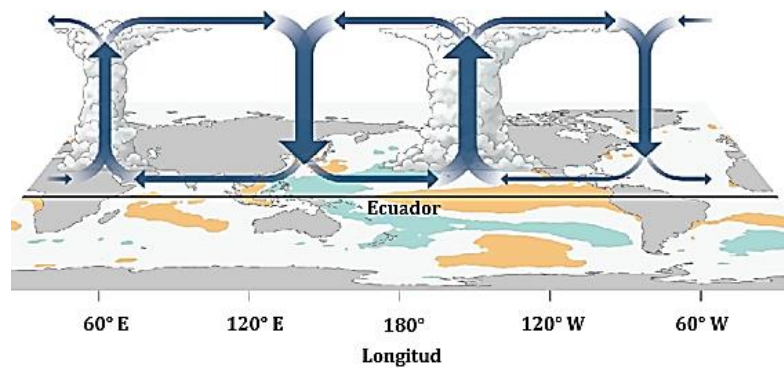


Figura 8, Celda de Walker en condiciones de El Niño.
Fuente: (Herrera, 2015)

Como resultado a la modificación en la celda de Walker, se produce un aumento significativo de las precipitaciones sobre el Pacífico oriental y una disminución de las mismas sobre el Pacífico occidental.

▪ **Efectos en las concentraciones de ozono troposférico.**

El ozono es un componente natural de la atmósfera y se encuentra presente desde la superficie terrestre hasta una altura aproximada de 70 kilómetros. La mayor concentración, cerca del 90%, se encuentra en la estratósfera (entre los 19 y los 50 kilómetros) con una máxima concentración entre los 19 y 23 kilómetros que varía según la época y el lugar geográfico. Esta capa de máxima concentración se conoce como “*La capa de ozono*” (Figura 9) (Mera Garrido, 2005; Mohanakumar, 2008).

En la tropósfera, el ozono es un contaminante secundario, producido por la reacción química entre la luz del sol con moléculas como los óxidos de nitrógeno (NO_x) o compuestos orgánicos volátiles (COVs), incluyendo al metano (CH_4), al monóxido de carbono (CO) y otros compuestos más complejos (Crutzen, 1974; Liu *et al.*, 1980; Atkinson, 2000). Los gases precursores en la formación de ozono, pueden estar presentes como resultado de las emisiones directas en una región y también debido al transporte atmosférico. Las tasas de estos procesos y el balance global O_3 dependen de diversas condiciones, como la intensidad solar, la temperatura, la presión, la concentración de precursores de O_3 y el contenido de vapor de agua en la atmósfera. No obstante, las concentraciones de ozono en la tropósfera también poseen una fuente natural, el ozono estratosférico, el cual es transportado desde la estratósfera debido a un mecanismo de

circulación denominado intercambio estratósfera-tropósfera (IET o STE en su sigla en inglés) (Quereda *et al.*, 2001; The Royal Society, 2008; Mohanakumar, 2008).

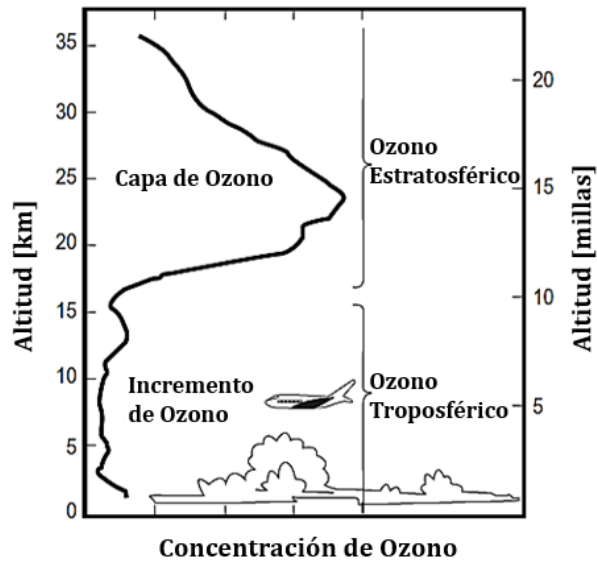


Figura 9, Distribución vertical del ozono en la Atmósfera.
Fuente: (Mohanakumar, 2008).

El IET es parte de la circulación general de la atmósfera y comprende el transporte de aire y sus componentes a través de la tropopausa (interface entre la estratósfera y la tropósfera). Desde hace tiempo se ha reconocido que el aire troposférico entra en la estratósfera a través de un movimiento vertical, que se genera principalmente en los trópicos por convección húmeda.

Este transporte juega un papel importante en la determinación de la composición química, tanto de la tropósfera como de la estratósfera. Debido a que en la tropósfera la estabilidad atmosférica es mucho menor que en la estratósfera la mezcla de sus componentes (contaminantes) es más rápida. Así pues, la tropopausa actúa como una barrera para el transporte ascendente de aire a la estratósfera (Mohanakumar, 2008; Highwood y Hoskins, 1998).

El transporte vertical de las especies químicas del aire en la tropósfera puede ocurrir en escalas de tiempo tan cortos como unas pocas horas gracias a los mecanismos de convección húmeda, y en escalas de tiempo de días cuando ocurre por movimientos turbulentos. Por otro lado, el transporte vertical a través de un rango de altitud similar en

la estratósfera toma de meses a un año, o incluso más (Figura 10). La diferencia se debe principalmente al rápido aumento de la proporción de mezcla de ozono y la rápida disminución de la relación de vapor de agua a medida que aumenta la altitud (Mohanakumar, 2008).

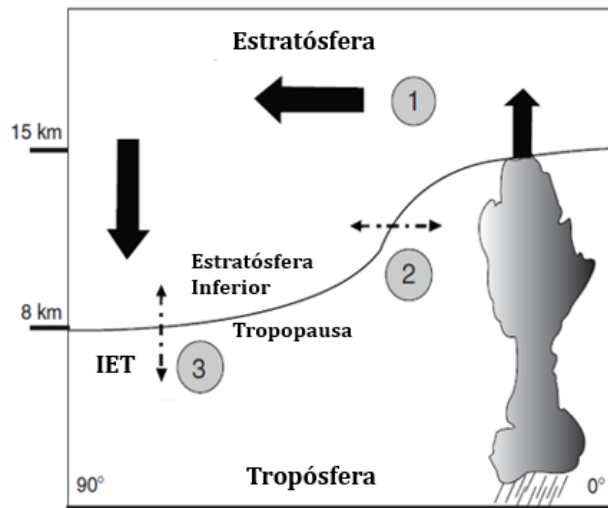


Figura 10, Esquema representativo de la circulación entre estratósfera y tropósfera.
Fuente: (Mohanakumar, 2008).

La producción de ozono tiene lugar principalmente en la estratósfera tropical como producto de la fotodisociación de moléculas de oxígeno. Sin embargo, la mayor parte del ozono se encuentra en las latitudes más altas, es decir, fuera de su región de origen, esto es resultado de la circulación de Brewer-Dobson (BD), la cual mueve lentamente el ozono desde los trópicos a latitudes medias y polares (Mohanakumar, 2008). BD, es un patrón de circulación lenta, propuesta para explicar la falta de agua en la estratósfera. Se presume que el déficit de agua en la estratósfera es producto de la liofilización del vapor de agua a medida que se mueve verticalmente a través de la tropopausa ecuatorial. Por otra parte, explicaría las altas concentraciones de ozono observadas en las regiones polares y el mecanismo de distribuciones de componentes de larga vida, como el óxido nítrico y el metano (Figura 11).

El intercambio estratósfera-tropósfera tiene implicaciones directas en la disminución del ozono estratosférico y el aumento del ozono troposférico, ya que, representa un importante mecanismo de distribución de componentes atmosféricos. La tropósfera, por su

parte, tiene concentraciones relativamente bajas de ozono, excepto en entornos urbanos altamente contaminados. (Hartmann *et al.*, 2000).

El fenómeno de El Niño genera cambios en los patrones de convección, lo que resulta en diferencias significativas en el transporte de aire rico en ozono de la estratósfera a la tropósfera. Se ha observado que durante los eventos de El Niño aumenta el IET.

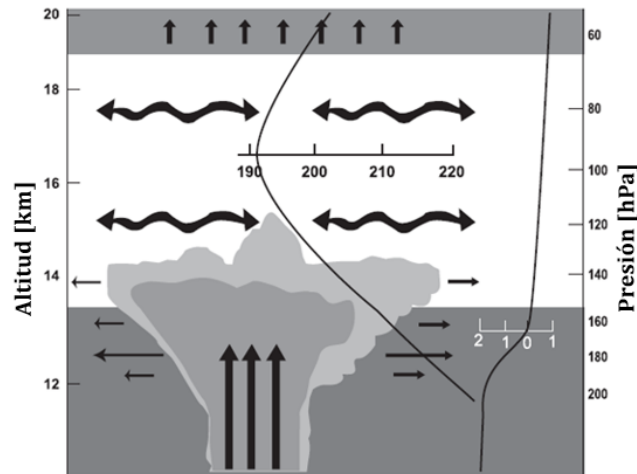


Figura 11, Intercambio Tropósfera-Estratósfera y circulación de Brewer-Dobson.
Fuente: (Mohanakumar, 2008).

En el Pacífico occidental, se suprime la convección de masas de aire, lo que disminuye el transporte vertical ascendente del ozono. Por el contrario, en el Pacífico oriental, se observa un aumento de la humedad y por ende una mejora del transporte ascendente, lo que favorece el transporte de ozono desde la tropósfera a la estratósfera. A partir de estos resultados, es que han afirmado que los patrones de circulación afectan tanto a la fotoquímica como al transporte estratósfera-tropósfera, lo que genera variaciones en la columna de ozono troposférico (COT). Adicionalmente, el IET modifica la producción fotoquímica de ozono en las tropósfera (transporte de precursores por la tropopausa), estos efectos son más pronunciados en las regiones extra-tropicales (de los 30° a 60° de latitud) (Zeng y Pyle, 2005; Ganguly y Iyer, 2014; Ziemke *et al.*, 2015).

En otros estudios, se ha determinado que los cambios en la COT difieren según el tipo de fenómeno de El Niño. Estas fluctuaciones se deben a la desigualdad de los efectos sobre las condiciones atmosféricas. El Niño Modoki, fortalece la circulación BD, lo que produce un aumento en el transporte de aire pobre en ozono de la tropósfera a la estratósfera,

generando como resultado una disminución en la columna de ozono estratosférico (COE), efecto que es más pronunciado sobre el Pacífico oriental tropical que sobre otras áreas. Esta disminución, es la responsable del aumento en la radiación UV que alcanza la tropósfera tropical generando un aumento significativo en la COT (Xie *et al.*, 2014). El Niño Canónico, por su parte, puede influir en la distribución global de ozono a través de cambios en la surgencia tropical, la cual se relaciona con el ozono estratosférico inferior. Adicionalmente, la sequedad en el Pacífico occidental, producto del desplazamiento de las precipitaciones, aumenta la vida útil de la capa de ozono, en otras investigaciones se ha demostrado el aumento de la COT sobre Indonesia también asociada con la sequedad y la convección suprimida. Esta última, por su contribución en el descenso de ozono desde la estratósfera hacia la tropósfera (Xie *et al.*, 2014; Chandra *et al.*, 1998; Fujiwara *et al.*, 2000; Zeng y Pyle, 2005). En contraste, en el Pacífico Oriental, el aumento de la humedad mejora el transporte ascendente, lo que disminuye la columna de ozono troposférico (Chandra *et al.*, 1998; James, 2003; Langford y Masterst, 1998; Zeng y Pyle, 2005)

Por otro lado, se ha demostrado que existe una relación negativa entre la humedad y la concentración de ozono troposférico. Este hecho queda en evidencia en presencia de El Niño Canónico, cuyas alteraciones generan el aumento de las precipitaciones en el Pacífico oriental, incrementando la humedad, y disminuyendo la concentración de ozono troposférico (Chandra *et al.*, 1998).

2.2. Santiago de Chile.

Santiago es la ciudad capital de Chile y la Región Metropolitana (RM). La RM, se emplaza entre la Cordillera de La Costa y de Los Andes, abarcando una superficie de 15.554,5 km², de los cuales el 85,7% corresponde a terrenos montañosos, situado en los alrededores de la cuenca de Santiago (Ministerio del Medio Ambiente, 2015; Muñoz, 1992). Esta región reúne al 40,33% de los habitantes de Chile, según el CENSO del año 2012 y políticamente se encuentra dividida en 6 provincias y 52 comunas (la mayoría de las comunas corresponden a zonas urbanas). La provincia de Santiago cuenta con 32 del total de las comunas y el año 2002 rodeaban los 5 millones de habitantes (Ministerio del Interior, 1980).

2.2.1. Características Geográficas.

La cuenca de Santiago se ubica en plena depresión intermedia, rodeada y aislado por los brazos del Cordón de Chacabuco (Norte), la Cordillera de la Costa (Oeste), la Angostura de Paine (Sur) y la Cordillera de los Andes (Este).

El Piedemonte andino de la ciudad de Santiago se ubica entre los 800 y 1500 msnm (Figura 12). Este lugar es fuente de aire limpio, y se ubica, generalmente, a una altura superior a los límites de la capa de inversión térmica que atrapa la contaminación atmosférica, por lo que, en comparación con las áreas urbanas, presenta una menor concentración de material particulado y gases contaminantes (Romero y Vásquez, 2005). En esta zona emplazan las comunas de Lo Barnechea, Las Condes, La Reina, Peñalolén, La Florida y parte de las comunas de Puente Alto y San José de Maipo (Ramírez, 2012).

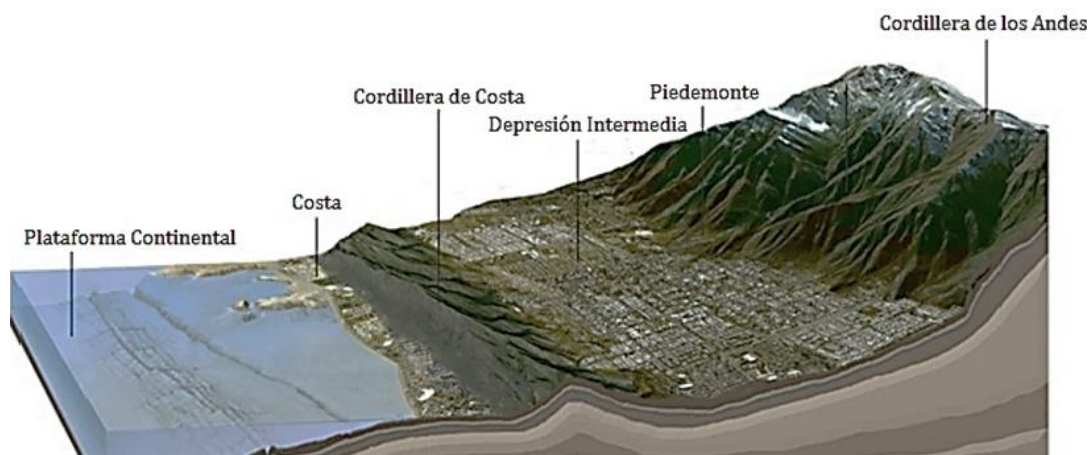


Figura 12, Corte transversal de la Zona Central de Chile.
Fuente: (Ramírez, 2012)

2.2.2. Características Climáticas.

La cuenca de Santiago se ubica en latitud 33,5 S y longitud 70,7 W, lugar de transición de dos regímenes de circulación general de la atmósfera, zona de subsidencia de La Celda de Hadley y La celda de Ferrel (Figura 13). La circulación de las celdas es responsable de la presencia del Anticiclón Semipermeable del Pacífico Sur y la generación de los vientos Alisios.

Por otra parte, la zona se encuentra expuesta a una alta insolación lo que incrementa la temperatura superficial del suelo, generando corrientes de aire ascendentes, las que al encontrarse con corrientes descendentes dan origen al fenómeno de Inversión Térmica radiativa.

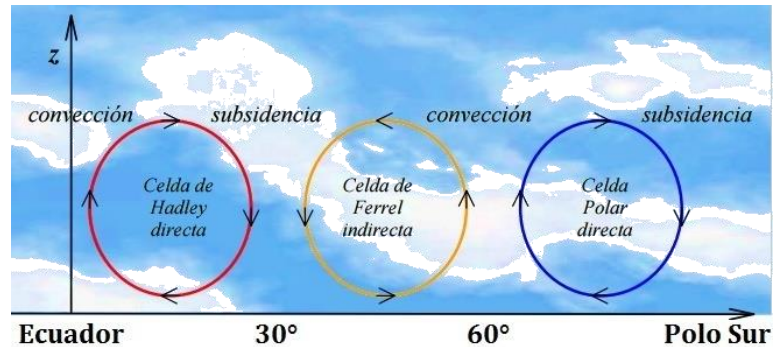


Figura 13, Celdas de Circulación Global.
Fuente: (Inzunza 2012).

▪ **Inversión térmica.**

En Santiago, la inversión térmica de subsistencia se manifiesta por la compresión del aire descendente, asociado a un sistema de altas presiones (anticiclón subtropical del Pacífico). Adicionalmente, durante los meses de otoño-invierno, se suma el efecto de la inversión térmica radiativa, la cual es causada por un rápido enfriamiento de la superficie terrestre durante la noche (Muñoz, 1992; Romero *et al.*, 2010; D.S. N°16, 1998).

El fenómeno de inversión, provoca modificaciones del gradiente vertical de temperaturas (GVT) (Muñoz, 1992; Romero *et al.*, 2010). Este es una medida de la estabilidad atmosférica y se define como la variación negativa de la temperatura en función de la altura. Valores de $GVT > 0$ indican que la temperatura disminuye con la altura (Figura 14a), mientras que valores $GVT < 0$ indican que la temperatura aumenta con la altura este episodio es característico en capas de inversión térmica (Figura 14b) (Garreaud, 2007; Corral, 2014). Cuando el GVT es menor a cero, las condiciones atmosféricas son muy estables, esto atenúa el movimiento ascendente de las masas de aire, y con ello la dispersión vertical de los contaminantes, impidiendo el mezclado del aire inferior con el superior (Mera Garrido, 2005).

El acoplamiento de la inversión térmica de subsidencia con la radiativa, sobre la cuenca de Santiago, aumenta la estabilidad del aire cercano a la superficie, provocando una disminución de la turbulencia, la cual limita la dispersión vertical de los contaminantes, como consecuencia durante las noches y la madrugada los contaminantes permanecen concentrados en el lugar de emisión. Durante el día, al aumentar la radiación solar, aumenta la capa de mezcla, por lo que aumenta la distribución de contaminantes (Garreaud y Rutlant, 2006). La altura a la que ocurre el fenómeno varía entre los 200 y 1000 metros de altura (para invierno y verano respectivamente) y depende directamente de la temperatura superficial del suelo. Motivo por el cual, la contaminación atmosférica aumenta notablemente en invierno, en relación a los meses de verano (Muñoz, 1992; Lavado, 2012; Ministerio del Medio Ambiente, 2015; Meléndez, 1992; Romero *et al.*, 2010).

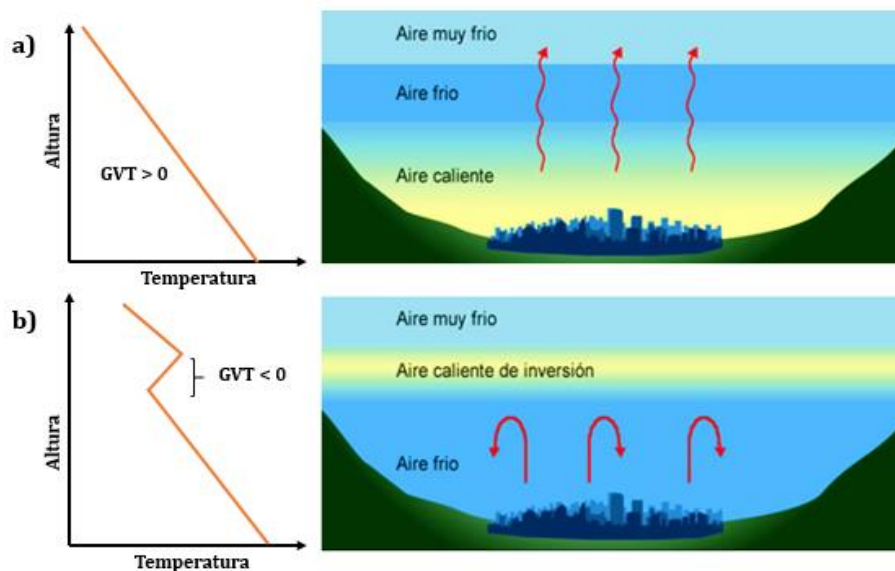


Figura 14, a) Perfil térmico en condiciones normales b) Perfil térmico de inversión térmica
Fuente: (Meléndez 1992)

2.2.3. Contaminación Atmosférica.

Durante el 2012, Santiago fue catalogada como la quinta ciudad con peor calidad del aire de Latino América (AIDA, 2012), producto de la alta contaminación atmosférica de la ciudad, atribuible a factores naturales y antropogénicos.

- **Factores naturales.**

Entre los factores naturales que influyen en la depuración de la atmósfera, se encuentran los vientos y las precipitaciones, los que se encuentran estrechamente relacionados con la geografía y el clima de la región.

- a) Los Vientos.

Los vientos, obedecen esencialmente a las variaciones de temperatura, motivo por el cual, en el transcurso del día cambian constantemente de sentido y en los meses de invierno disminuye su intensidad. El efecto genera que el aire contaminado (proveniente de la zonas industriales y mayormente urbanizada del fondo de la cuenca) sea movilizado hacia la cordillera durante la tarde (vientos del SO) y hacia el centro durante la noche y madrugadas (Brisa del Este) (Romero y Vásquez, 2005). Los vientos del SO producen la entrada de aire limpio por el valle del Río Maipo, el que sale por los cajones andinos del Río Mapocho y Maipo (efecto chimenea), este efecto ocurre preferentemente en los meses de verano, debido a que las condiciones de invierno inducen la acumulación de los contaminantes (Garreaud y Rutlant, 2006). Por otra parte, las condiciones geográficas y la presencia de la capa de inversión térmica, limitan el alcance y la frecuencia de los vientos, provocando una baja tasa de dispersión sobre todo en los meses de invierno (Biblioteca Nacional de Chile, 2015; Muñoz, 1992).

En consecuencia, el aire de Santiago presenta elevados niveles de contaminación, durante la mayor parte del año (Romero y Vásquez, 2005).

- b) Deposiciones.

Las deposiciones pueden ser divididas en humedad y secas. Entre las húmedas se encuentran las precipitaciones, éstas son relativamente escasas y se presentan generalmente en forma de chubascos, entre los meses de mayo y septiembre alcanzando, en años normales, los 330 [mm] de agua, por lo que no representan un importante mecanismo de depuración atmosférico (Muñoz, 1992). Por otra parte, el rocío o deposición seca, es un mecanismo constante e importante en la depuración del aire más cercano a la superficie, sobre todo durante los años con poca frecuencia de lluvias (Rubio *et al.*, 2001).

- **Factor antropogénico.**

Santiago desde siempre ha presentado una elevada tasa de crecimiento poblacional, entre los años 1960 y el 2002, la población experimentó un incremento de un 67,24% (Figura 15) (Universidad de Chile, 2008), este crecimiento se encuentra asociado al aumento en la demanda de energía, en el parque vehicular (de un 30,4% entre 2009 y 2015) (INE, 2016), y al incremento de los sectores industriales. Factores en conjunto con otras actividades humanas, han favorecido el incremento de la contaminación ambiental, causada por emisiones de material particulado (MP) y gases como el dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y ozono (O₃), además de compuestos orgánicos volátiles (COV) (Romero *et al.*, 2010; Muñoz, 1992; Biblioteca Nacional de Chile, 2015).

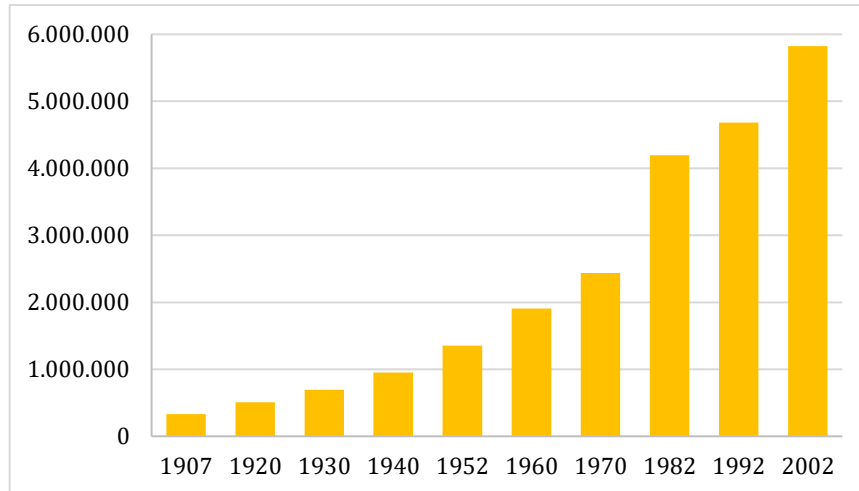


Figura 15, Crecimiento poblacional de Santiago de Chile
Fuente: (INE 2016; Universidad de Chile 2008)

2.2.4. Políticas de calidad de aire.

Producto de los reiterados episodios de contaminación, y a la presión mediática es que el año 1996, a través del D.S. N°131 del ministerio Secretaría General de la Presidencia, la Región Metropolitana fue declarada Zona Saturada por material particulado respirable PM₁₀, partículas en suspensión, ozono y monóxido de carbono, y Zona Latente por dióxido de nitrógeno. La Ley N°19.300, Sobre Bases del Medio Ambiente, define como Zona Latente “aquella en que la medición de la concentración de contaminantes en el aire, agua o suelo se sitúa entre el 80% y el 100% del valor de la respectiva norma de calidad ambiental”, y Zona

Saturada “aquella en que una o más normas de calidad ambiental se encuentran sobrepasada” (Ley N°19.300, 1994). Adicionalmente, en sus Art. N°44 y Art. N°45, establece que la autoridad debe desarrollar planes de descontaminación en áreas en donde los niveles de contaminación excedan sistemáticamente las normas ambientales (Zona Saturada), y planes de prevención donde dichas normas se encuentren en peligro de ser superadas (Zona Latente) (Ley N°19.300, 1994). En base a lo señalado, la Comisión Nacional del Medio Ambiente elaboró “El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA)” para la RM, el cual fue aprobado por el DS N°16 de 1998, el cual fue actualizado y reformulado por DS N°58 de 2003 y el DS N°66 de 2009, este último actualmente vigente. Mediante la resolución exenta N°218 de 2015, del MMA, se dio inicio al proceso de revisión, reformulación y actualización del DS N°66 (Ministerio del Medio Ambiente, 2015; Biblioteca Nacional de Chile, 2015). En la actualidad se encuentran normativas vigentes para calidad del aire, estas establecen los límites permitidos para cada contaminante (Tabla 2).

Tabla 2, Límites normativos vigentes para calidad del aire.

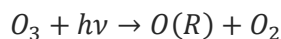
Contaminante	Límite	Excedencia	Normativa
SO₂	Media aritmética diaria de 250 µg/m ³ (96 ppb)	Percentil 99	(D.S. N°113, 2002)
	Media aritmética anual de 80 µg/m ³ (31 ppb)	No permite	
MP10	Media aritmética diaria de 150 µg/m ³	Percentil 98	(D.S. N°59, 1998; D.S. N°45/2001)
	media aritmética trianual de 50 µg/m ³	No permite	
MP2,5	Media aritmética diaria de 50 µg/m ³	Percentil 98	(D.S. N°12/2010)
	Media aritmética anual de 20 µg/m ³	No permite	
NO₂	media aritmética horaria de 400 ppb	Percentil 99	(D.S. N°114, 2002)
	media aritmética anual de 100 ppb	No permite	
O₃	120 µg/m ³ (61ppb) Promedio móvil 8 horas	Percentil 99	(D.S. N°112, 2002)

Debido a los problemas en la Calidad del Aire, se han desarrollado estudios que han permitido establecer relaciones entre la concentración de los contaminantes y la ubicación de estos en la cuenca, evidenciando que la distribución no es homogénea. Como es el caso del material particulado el cual se encuentra en mayor concentración en la zona Poniente, mientras que los gases de combustión predominan en el centro y el ozono (O_3) en el sector Oriente de la ciudad. Desde el punto de vista temporal, las mayores concentraciones de O_3 se presentan en primavera y verano (Romero *et al.*, 2010).

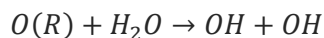
2.3. Formación de ozono troposférico

El ozono troposférico es un contaminante secundario de corta duración, perjudicial para la salud humana y de los ecosistemas, además de ser un gas de efecto invernadero (Monks *et al.*, 2015). Es formado por la reacción fotoquímica de los NO_x bajo condiciones de alta insolación, por lo que sus altas concentraciones se localizan, especialmente, en ciudades de latitudes subtropicales donde predominan las altas presiones y los cielos despejados (Romero *et al.*, 2010). Los procesos químicos clave que conducen a la producción y destrucción de ozono son accionados por ciclos de reacciones, las que implican la formación de radicales libres como intermediarios, estos se forman principalmente por la fotólisis del ozono (reacción 1). En longitudes de onda UV más corta que 320 [nm], la fotólisis de ozono genera átomos de oxígeno excitados electrónicamente, $O(R)$, que pueden reaccionar con el vapor de agua para formar radicales hidroxilo (OH) (reacción 2) o la formación de O_3 , después de la colisión con una molécula inerte ("M"), la que comúnmente es nitrógeno, N_2 (reacciones 3 y 4) (The Royal Society, 2008).

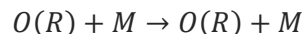
Reacción 1



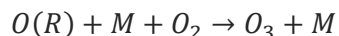
Reacción 2



Reacción 3



Reacción 4

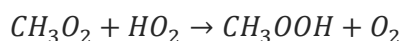


La eficiencia de conversión de O(R) a OH radical depende de las velocidades relativas de las reacciones 2 y 3. Esto se determina principalmente por la concentración de vapor de agua en el aire que, a su vez, depende de la temperatura predominante y la humedad relativa. Los radicales OH juegan un papel central en la química del ozono troposférico, ya que, el radical OH reacciona principalmente con el CH₄ y CO en la atmósfera para iniciar los ciclos de reacción que producen y eliminan ozono (The Royal Society, 2008). El factor que determina si el ozono se produce o se retira de la atmósfera, es la concentración de NO_x. El efecto de estos gases se puede dividir en tres regímenes, con respecto a la emisión:

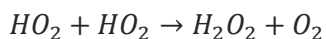
- **Régimen de baja emisión de NO_x**

Corresponden a las regiones remotas de la atmósfera, tales como la región del Pacífico Sur que tiene niveles muy bajos de NO_x (menos de 20 ppb), y se caracteriza por la eliminación de O₃. Las reacciones de OH con metano y monóxido de carbono conducen a la formación de radicales peroxi, CH₃O₂ y HO₂, que se eliminan por sus reacciones mutuas para formar hidroxiperóxidos de metilo CH₃OOH, y peróxido de hidrógeno H₂O₂ (The Royal Society, 2008).

Reacción 5

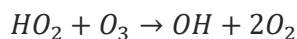


Reacción 6



Estas reacciones constituyen pérdida de ozono porque la secuencia se comienza con la reacción 1. Algo de remoción adicional de ozono también se debe a que los radicales HO₂ pueden reaccionar con O₃ obteniendo radicales OH, como se muestra en la siguiente reacción:

Reacción 7



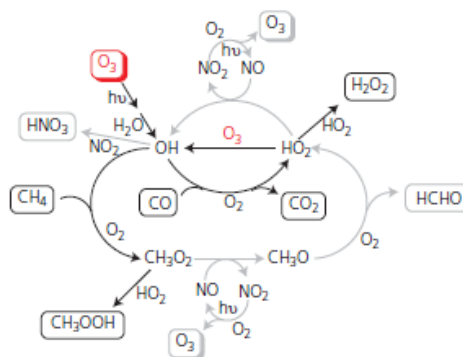
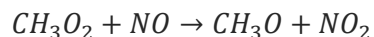


Figura 16, Esquema que resume las reacciones en régimen de baja emisión de NO_x.
Fuente: (The Royal Society, 2008).

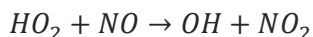
▪ Régimen de emisión intermedia de NO_x

Este régimen se caracteriza por la formación neta de ozono, ya que la tasa de formación aumenta con el incremento en la concentración de NO_x. Este se refleja en zonas rurales de países más industrializados. Las reacciones de radicales peroxi con monóxido de nitrógeno (NO) resulta en la formación de dióxido de nitrógeno (NO₂), cuya posterior fotólisis, seguida por la reacción 4, generando O₃ (The Royal Society, 2008).

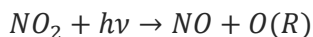
Reacción 8



Reacción 9



Reacción 10



Estas reacciones forman parte de los ciclos de multiplicación de radicales libres que forman O₃, estas pueden ocurrir varias veces antes de ser detenidas por reacciones de termino. En este régimen, los niveles de NO_x permanecen suficientemente bajos como para que la formación de peróxido continúe siendo el radical importante. La formación de ozono, en este régimen, es conocida a menudo como "NO_x limitada", debido a que la tasa de formación de ozono aumenta con el aumento de las concentraciones de NO_x, de manera que el aumento de NO_x permite un mayor número de ciclos de formadores de radicales

libres antes de la terminación. En contraste, la tasa de formación de O_3 es insensible a los cambios en la concentración de CH_4 o CO y a las entradas de otros COVs, es decir en algunas ciudades la formación de ozono está limitada por la concentración de COVs, pero en otras por la presencia de NO_x (Lavado, 2012). Esto se debe a que el radical OH reacciona con los compuestos orgánicos exclusivamente como parte de los ciclos de multiplicación de radicales libres que forman O_3 , no estando disponible en la reacción de terminación radical (The Royal Society, 2008).

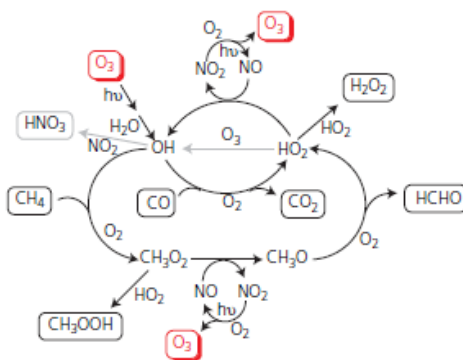


Figura 17, Esquema que resumen el régimen de emisión de NO_x intermedia.
Fuente: (The Royal Society, 2008).

■ Alta emisión de NO_x

En este régimen las reacciones 8 y 9 dominan, pero la formación de ozono queda inhibida por el aumento de los NO_x . Esto se debe a que los radicales OH reaccionan con NO_2 para formar ácido nítrico (HNO_3), transformándose en una reacción de término importante para los radicales.

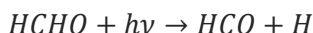
Reacción 11.



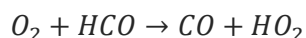
En estas circunstancias disminuye la cantidad de radicales libres que propagan el ciclo del ozono, por lo que disminuye la tasa de formación. No obstante, las emisiones elevadas de CH_4 o CO permiten la libre-propagación del O_3 , por lo que compiten con la reacción 11, esto aumenta la tasa de producción de ozono. En consecuencia, las emisiones de COV antropogénico (por ejemplo, del transporte por carretera o por evaporación del disolvente) y COV biogénicos (más notablemente el isopreno) conducen a un aumento general de la tasa de formación de O_3 . Las condiciones que prevalecen en este régimen se

aplican a lugares que son relativamente cerca de las fuentes de contaminación (por ejemplo, el entorno urbano) y se corresponden con las condiciones intensas cuando las tasas de formación de O_3 se producen durante un periodo limitado de tiempo (episodios altos O_3). Esto ocurre en virtud de las entradas de COV reactiva, cuando los niveles de NO_x son altos, lo que a menudo se conoce como "COV-limitado" o "COV sensible" (The Royal Society, 2008). Los radicales de oxidación en presencia de metano, conduce a la generación de formaldehído (HCHO), cuya oxidación se inicia por fotólisis parcial, contribuyendo a la generación de radicales.

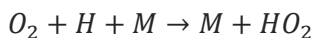
Reacción 12.



Reacción 13



Reacción 14



Como resultado, la formación de HCHO (y productos oxigenados análogos de oxidación) tiene un impacto sobre las tasas de los ciclos de oxidación descritas anteriormente, a través de la generación de radicales secundaria. También hay que señalar que la oxidación de HCHO y CH_4 son las principales fuentes de CO (The Royal Society, 2008).

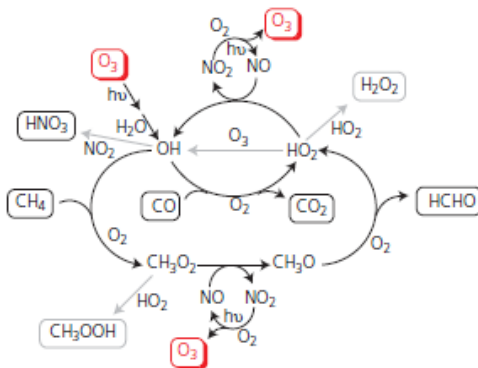


Figura 18, Esquema resumen de régimen de alta emisión de NO_x
Fuente: (The Royal Society, 2008).

2.4. Comentarios Finales

A partir de los antecedentes presentados, se pretende relacionar las concentraciones de Ozono troposférico en la ciudad de Santiago, privilegiando aquellas comunas que se encuentran mayormente afectadas por el contaminante. A partir de la información se observarán y analizará el cumplimiento de los siguientes puntos:

- El aumento de las condiciones pluviométricas entre las latitudes 30° y 40° S ocasionadas por El Niño Canónico, durante los meses de evaluación. Con el fin de identificar un aumento en la depuración de la atmósfera santiaguina, disminuyendo las concentraciones de contaminantes como el ozono troposférico.
- Durante los periodos a estudiar, se verificará que la fluctuación de las concentraciones de ozono se encuentre relacionada con variaciones en la concentración de óxidos de nitrógeno.
- En periodos de El Niño Modoki, se generan disminuciones de las concentraciones de ozono estratosférico, por lo que se esperaría que aumentaran las reacciones fotoquímicas de formación de ozono troposférico, esto debería reflejar un incremento significativo de la concentración de ozono troposférico y una disminución abrupta de las concentraciones de NO_x.

Capítulo 3. Materiales y Método.

3.1. Materiales.

3.1.1 Área de Estudio.

Para el estudio se consideraron comunas con altos niveles de ozono, que se encontraran ubicadas en el piedemonte andino (sector con altos niveles de insolación) De todas las comunas que se encuentran en la red de monitoreo de calidad de aire, sólo Las Condes, La Florida y Puente Alto se encuentran en el pie de monte (Figura 20).

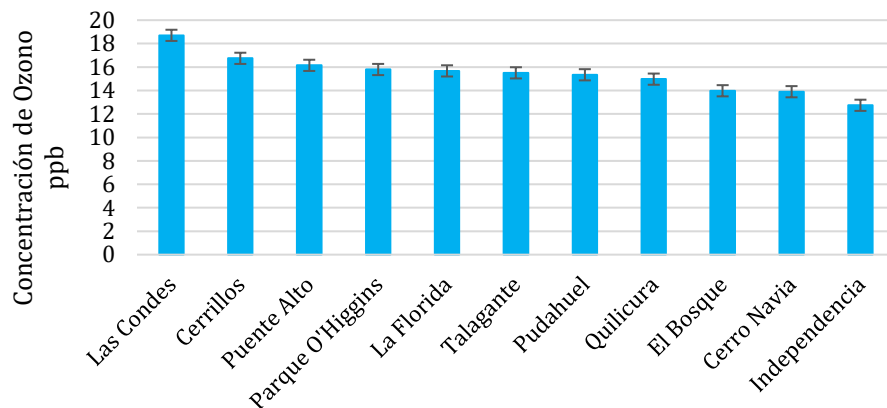


Figura 19, Concentraciones de ozono de las comunas pertenecientes a la red de calidad del aire.
Fuente: Elaboración Propia.

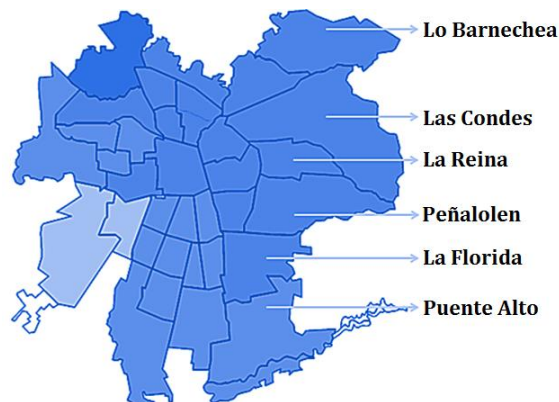


Figura 20, Mapa de Santiago con las comunas ubicadas en el piedemonte.
Fuente: Elaboración Propia.

3.1.2. Calidad del Aire en Santiago.

Para el análisis se utilizarán los datos de concentración de ozono troposférico y contaminantes asociados a su formación (NO_x), tomando los reportes horarios, mensuales y anuales de las comunas seleccionadas, desde el año 1997 al 2016. Estos fueron obtenidos de la red de calidad de aire de Santiago, los cuales se encuentran disponibles en la página del Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA) (SINCA, 2016).

- **Estaciones de Monitoreo.**

- *Las Condes.*

Información General, Estación Las Condes	
Propietario	Ministerio del Medio Ambiente
Coordenadas UTM	358305 E63059906 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	1 de abril de 1997

- *La Florida*

Información General, Estación La Florida	
Propietario	Ministerio del Medio Ambiente
Coordenadas UTM	352504 E6290304 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	24 de marzo de 1997

- *Puente Alto*

Información General, Estación Puente Alto	
Propietario	Ministerio del Medio Ambiente
Coordenadas UTM	352049 E6282013 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	20 e mayo de 2008

3.1.3. Datos Meteorológicos.

▪ Precipitaciones.

Para las precipitaciones, se utilizaron los datos reportados diariamente y mensualmente. Estos fueron obtenidos de los informes de la Dirección General de Aguas (DGA, 2016). Las estaciones de monitoreo consideradas corresponden a:

▪ *Cerro Calan*

Información General	
Coordenadas UTM	356880 E6303490 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	31 de mayo de 1975

▪ *La obra recinto EMOS.*

Información General	
Coordenadas UTM	361970 E6281783 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	31 de diciembre de 1994

▪ *Quebrada Macul*

Información General	
Coordenadas UTM	359119 E6291692 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	30 de abril de 2003

▪ *Terraza oficina central DGA*

Información General	
Coordenadas UTM	346948 E6297392 N
Huso Horario	19
Inicio de Operación	31 de mayo de 1960

- **Niveles de Radiación.**

Los datos utilizados corresponden a los ciclos horarios y mensuales de radiación, de la ciudad de Santiago. Estos fueron obtenidos desde el Explorador de Energía Solar para Autoconsumo del Ministerio de Energía y La Universidad de Chile (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017).

- **Datos de Índice de Oscilación del Sur e Índice Oceánico de El Niño.**

Para determinar los periodos en que desarrolló el fenómeno de El Niño, se utilizaran los datos de IOS e ION reportados por el centro de investigación ambiental de La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, en su sigla en inglés). En el caso de ION, la zona a utilizar es la Niño 3.4 (NOAA, 2016).

3.2. Método

3.2.1. Determinación de los periodos de estudio.

- **Años con y sin presencia del Fenómeno de El Niño.**

Para identificar los periodos en que se ha presentado el fenómeno de El Niño, se analizaron los valores tanto en el Índice de Oscilación del Sur (IOS), como del Índice Oceánico de El Niño (ION) en la zona Niño 3.4, tomando en consideración que la presencia del fenómeno coincide con fases negativas de IOS y valores de ION que superan los 0,5°C. Estos resultados fueron contrastados con la información entregada por referencias bibliográficas, con el fin de obtener una mayor precisión en el rango de evaluación.

Adicionalmente, a los años que no presentaban el fenómeno de El Niño, se les debe eliminar los periodos en que se ha presentado el fenómeno de La Niña, para que los efectos de este no interfirieran en el análisis de los resultados.

- **Meses característicos.**

Se define los meses característicos, como aquellos en que se debería presentar una mayor concentración de Ozono. Para la determinación de estos periodos, se usaron los niveles de

radiación solar, con el fin de establecer cuando debería predominar la síntesis de ozono troposférico. El análisis se realizó utilizando los datos del Explorador de radiación solar tomando como límite inferior 6 kW/m^2 (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017).

- **Horas características.**

Las horas características son aquellas que presentan la mayor radiación en el día y que adicionalmente se encuentran en mes característicos, el fin es determinar el periodo de tiempo en que ocurre la mayor fotosíntesis de ozono troposférico. El análisis se realizó utilizando los datos del Explorador de radiación solar tomando como límite inferior 400 W/m^2 (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017).

3.2.2. Análisis de los datos.

Una vez que se han determinado:

- Los años con y sin presencia del fenómeno.
- Los meses característicos.
- Las horas características.

Se estudia las concentraciones de ozono para estos periodos, considerando que el análisis debe ser realizado por cada comuna, para ellos se calculará el promedio mensual y horario (por comuna) de la concentración del contaminante en estudio (Ozono), para los años con presencia del fenómeno de El Niño, por el tipo de El Niño (Canónico o Modoki) y para los años sin el fenómeno (descartando los años con presencia de La Niña), como se indica en la Figura 2121.



Figura 21, Esquema de análisis de datos.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Comparación y contraste de los resultados.

Los resultados obtenidos serán graficados, con el fin de observar la tendencia de las concentraciones de ozono. Adicionalmente, se considerará las barras de error típico de la muestra, el cual indicará la variabilidad de cada uno de los promedios obtenidos en términos de su desviación estándar.

La comparación entre las medias de años con y sin presencia del fenómeno se realizará utilizando el método t-student, con un 95% de certeza y considerando como hipótesis nula que las medias para años neutros y de El Niño son iguales. La prueba también será aplicada a los meses por separado, con el fin de comparar sus promedios horarios en años con y sin presencia del fenómeno. Para confirmar la hipótesis nula se verificará que la probabilidad obtenida con la prueba sea mayor que la incerteza (5%).

Por otra parte, se utilizará el coeficiente de correlación de Pearson (R) y el coeficiente de determinación (R^2), para determinar la relación existente entre el ozono y la concentración de óxidos de nitrógeno, la temperatura y la radiación solar. Adicionalmente, se analizará si los NO_x tienen alguna relación con la temperatura y la radiación solar. La significancia de

las correlaciones se determinará utilizando la prueba de t-student, verificando que la probabilidad de error sea inferior al 5%. Los intervalos de R y R^2 , y su significado, se encuentran resumidos en las Tabla 3 y 4, respectivamente (Rafael, 2007).

Tabla 3, Intervalos de Coeficiente de correlación
Fuente: (Rafael, 2007)

Valores de R	Tipo de Correlación	Significado
$R = 0$	No existe Correlación	Los datos son independientes
$R = -1$	Correlación negativa perfecta	Al aumentar en 1 x, disminuye en 1 y.
$R = 1$	Correlación positiva perfecta	Al aumentar en 1 x, aumenta en 1 y.
$-1 < R < 0$	Correlación negativa	Relación inversa entre las variables x e y. Valores más cercanos a -1 poseen una correlación más fuerte, mientras que al estar más cercano a 0 la relación es más débil.
$0 < R < 1$	Correlación positiva	Relación directa entre las variables x e y. Valores más cercanos a 1 poseen una correlación más fuerte, mientras que al estar más cercano a 0 la relación es más débil.

Tabla 4, Intervalos de Coeficiente de determinación
Fuente: (Rafael, 2007)

Valores de R^2	Significado
$R^2 = 0$	El modelo no explica nada de y a partir de x
$R^2 = -1$	Ajuste perfecto, y depende de x
R^2 cercano a 1	Alta capacidad explicativa de la recta
R^2 cercano a 0	Baja capacidad explicativa de la recta

Capítulo 4. Resultados y Discusión.

4.1 Años con y sin presencia de El Niño.

Los periodos de El Niño, La Niña y Neutro se obtuvieron mediante la comparación de los datos de IOS e ION desde 1997 hasta 2016. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5, Periodos de El Niño, La Niña y Neutros.
Fuente: Elaboración propia a partir de los valores reportados(Xie *et al.*, 2014; NOAA, 2016)

Periodos				Condiciones		
Inicio de Anomalía		Fin de Anomalía		El Niño	La Niña	Neutros
1997	mayo	1998	mayo	x		
1998	junio	1999	agosto		x	
1999	octubre	2000	junio		x	
2000	septiembre	2001	febrero		x	
2001	marzo	2002	mayo			x
2002	junio	2003	abril	x		
2003	mayo	2004	julio			x
2004	junio	2004	diciembre	x		
2005	febrero	2004	julio			x
2006	agosto	2007	enero	x		
2007	febrero	2007	julio			x
2007	agosto	2008	mayo		x	
2008	junio	2009	junio			x
2009	octubre	2010	febrero	x		
2010	mayo	2011	abril		x	
2011	agosto	2012	marzo		x	
2012	abril	2014	octubre			x
2014	noviembre	2016	abril	x		

Adicionalmente, se determinaron los periodos en que se presentaron episodios de El Niño Canónico y El Niño Modoki, estos resultados se encuentran en la Tabla 6.

Tabla 6, Periodo de desarrollo del fenómeno de El Niño por tipo.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados por NOAA, y periodos reportados en investigaciones anteriores.

Inicio de Anomalía		Fin de Anomalía		Tipo de El Niño
1997	mayo	1998	mayo	Canónico
2002	junio	2003	abril	Modoki
2004	junio	2004	diciembre	Modoki
2006	agosto	2007	enero	Canónico
2009	octubre	2010	febrero	Modoki
2014	noviembre	2016	abril	Canónico

4.2 Periodos Característicos.

- **Meses Característicos.**

El ciclo de radiación anual de Santiago es variable (Figura 22), dependiendo de la estación. A partir de los niveles establecidos como moderados y altos (superior a 6 kW/m²) (Ministerio de Energía y Universidad de Chile 2017), se definió que los meses característicos, con mayor radiación, son enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre (Figura 23).

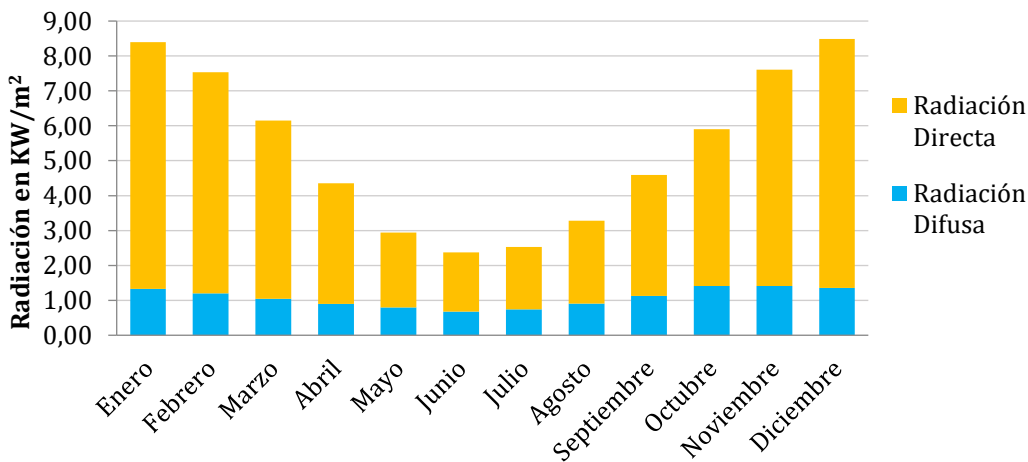


Figura 22, Ciclo de Radiación Anual, Ciudad de Santiago.
Fuente: Elaboración Propia a Partir de los datos del Explorador de Radiación Solar (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017)

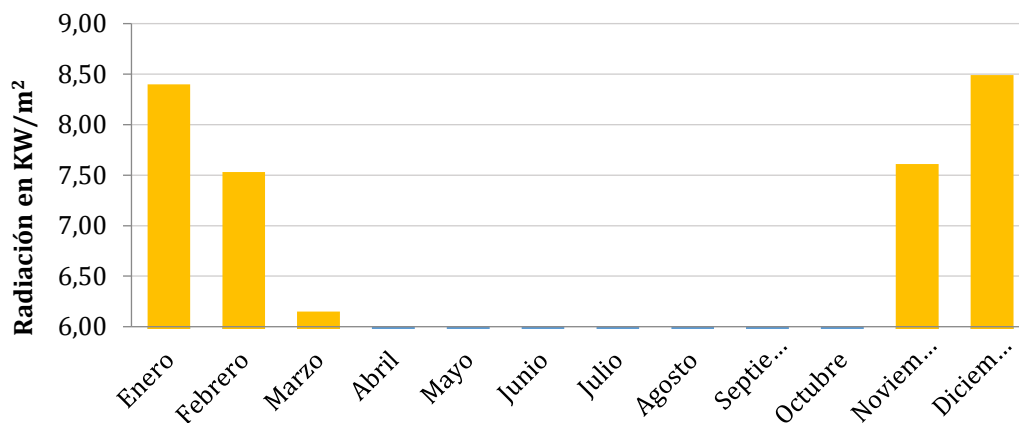


Figura 23, Meses con Radiación Solar Mayor a 6 kW/m².

Fuente: Elaboración Propia a Partir de los datos del Explorador de Radiación Solar (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017)

■ Horas Características.

En la Figura 24 se presenta el ciclo de radiación diaria de Santiago, utilizando los límites de radiación para niveles moderados y altos (superior a 400 W/m²) (Ministerio de Energía y Universidad de Chile 2017), se estableció que las horas con mayor radiación abarcan el periodo entre las 9:00 y las 15:00 horas (Figura 25).

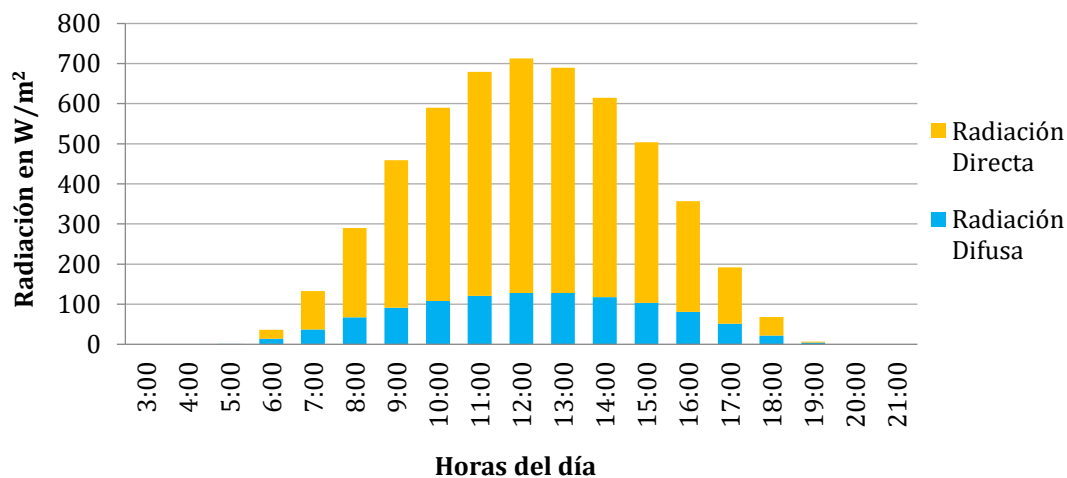


Figura 24, Ciclo Radiación Diario, Ciudad de Santiago.

Fuente: Elaboración Propia a partir de los datos del Explorador de Energía Solar (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017)

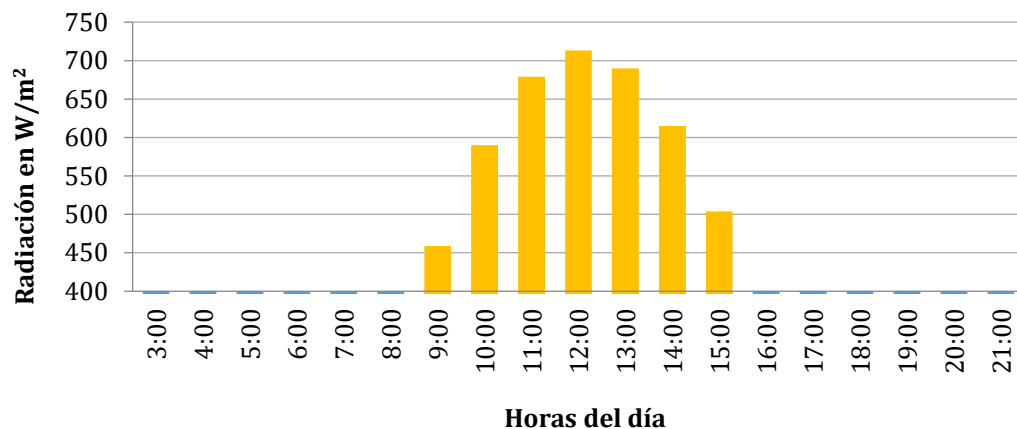


Figura 25, Horas con radiación solar mayor a los 400 W/m².

Fuente: Elaboración Propia a partir de los datos del Explorador de Energía Solar (Ministerio de Energía y Universidad de Chile, 2017)

4.3 Promedios de Concentración de Ozono por Comuna.

4.3.1. Comparación entre comunas.

▪ Promedios mensuales de Ozono sin El Niño.

La Figura 26, muestra los resultados obtenidos para las concentraciones de ozono mensual, en periodos con ausencia del fenómeno de El Niño. En este, es posible apreciar que las tres comunas poseen una tendencia similar, con elevados niveles de ozono durante el periodo de primavera-verano y bajas concentraciones durante los meses otoño-invierno, con mínimos en los meses de junio y julio. A simple vista, es posible relacionar las concentraciones del contaminante con la variación estacional de la zona.

En estudios anteriores, se ha demostrado el comportamiento estacional del ozono troposférico (Hirsch *et al.*, 1996; Tiwari *et al.*, 2008). Estos antecedentes, reafirman la coherencia de los resultados obtenidos, en los cuales se puede apreciar un rápido descenso durante el mes de abril, el cual puede ser producto del equinoccio de otoño a finales de marzo (disminución de radiación solar), posteriormente, se observa que los mínimos se generan durante el mes de junio y julio fechas en que ocurre el solsticio de invierno (mínimos de radiación incidente), desde ese punto hasta finales de septiembre (equinoccio de primavera) se produce un incremento de las concentraciones las cuales llegan a su

máximo durante los meses de enero, posterior al solsticio de verano (diciembre, además marca los mayores niveles de radiación).

Al comparar las comunas, es posible visualizar que Las Condes por lo general presenta los mayores niveles de ozono, a excepción de los meses de junio y julio en donde las tres comunas coinciden. Por otra parte, no es posible identificar notorias diferencias entre los resultados obtenidos para Puente Alto y La Florida.

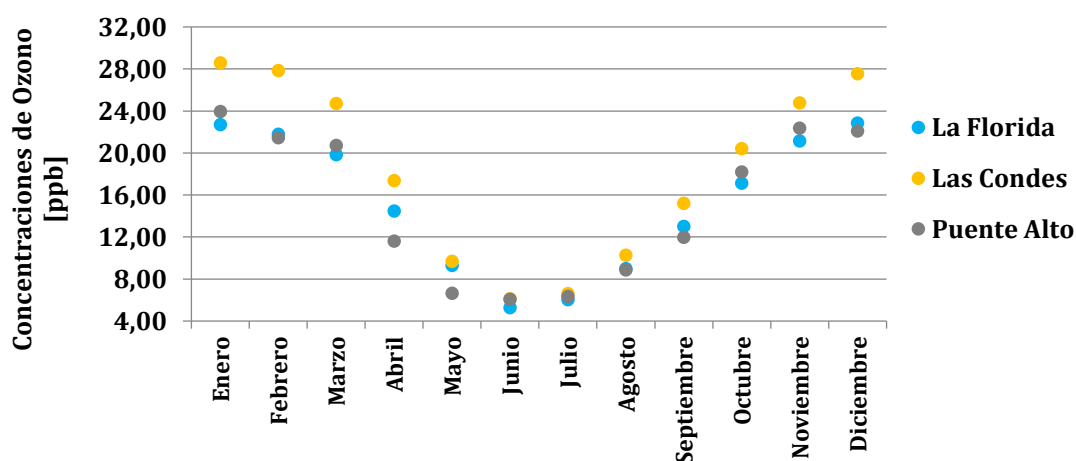


Figura 26, Concentraciones de Ozono promedio por comuna en años sin El Niño.
Fuente: Elaboración Propia.

▪ Promedios mensuales de Ozono con El Niño.

En la Figura 27 se presentan los resultados obtenidos para años con El Niño, desde la gráfica se observar una tendencia estacional de los niveles de ozono, con máximos en verano y mínimos en invierno, similar a los años neutros. Al comparar, mediante la t-Student, las medias de años con y sin presencia del fenómeno, se determinó que la probabilidad de que estas sean iguales para Las Condes, La Florida y Puente Alto son de 85,3%, 85,9% y 40%, respectivamente, es decir, no existen diferencias significativas entre ellas.

El impacto de la variabilidad climática sobre las concentraciones de ozono troposférico es un campo de estudio relativamente nuevo. Es por ello, que no existen investigaciones en las cuales se relacione la fluctuación de las concentraciones de ozono superficial, en latitudes medias, con la presencia de fenómenos climáticos como el Niño.

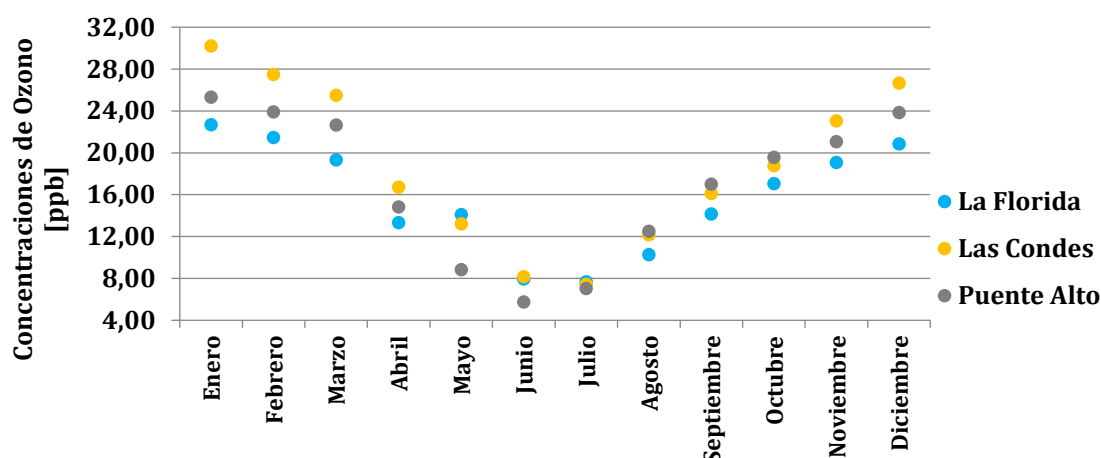


Figura 27, Concentraciones de Ozono en meses característicos por comuna, años con El Niño.
Fuente: Elaboración Propia.

4.3.2. Promedio de Concentraciones en Meses Característicos.

A partir de la información entregada en la Figura 23, se establece que los meses característicos (en la formación de ozono) van desde noviembre a marzo, esta información puede ser complementada con las temperaturas promedio presentadas para la zona, **Anexo 1.2.1.**

▪ Comparación entre años con y sin presencia del fenómeno de El Niño.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos para cada comuna, se elaboraron una serie de gráficos que permiten contrastar los promedios mensuales de ozono en años neutros con los resultados obtenidos para los años con presencia del fenómeno de El Niño. A continuación, se presenta el análisis realizado para cada comuna.

▪ Las Condes

La Figura 28, presenta los resultados para la comuna de Las Condes, en él se puede observar que para ambos casos la tendencia es similar, con concentraciones mínimas durante los meses de noviembre (N) y marzo (M), y máximo de concentraciones en el mes de enero (E). Con respecto al promedio de éstas, se puede mencionar que en la mayoría de los casos los niveles de ozono fueron superiores en los años neutros, a excepción de los meses de enero y marzo donde fueron superados por los años con presencia del fenómeno.

Al comparar las medias de los dos casos, se obtiene que la probabilidad de que sean iguales es de un 93,1%, es decir, no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para años con o sin presencia del fenómeno.

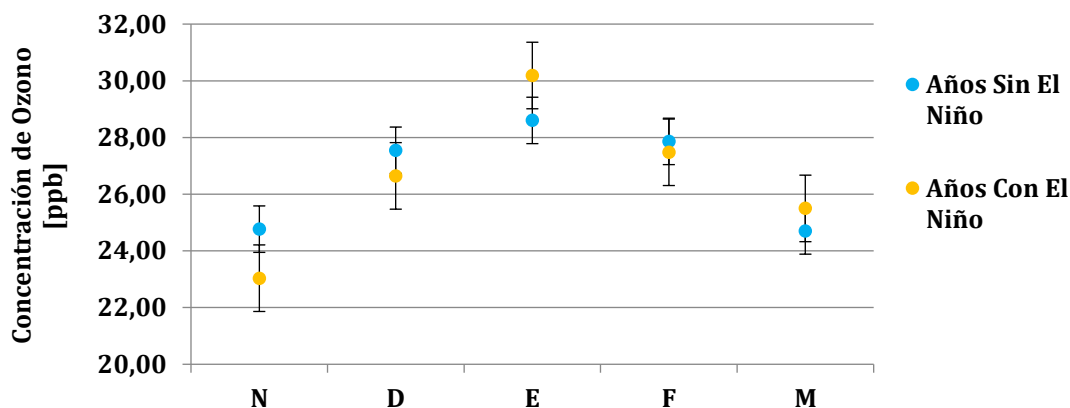


Figura 28, Comparación de meses característicos para años con y sin Niño, Las Condes.
Fuente: Elaboración Propia.

Por otra parte, al comparar los niveles mensuales de ozono con las medias de temperatura, se determinó que el coeficiente de correlación es de 0,988 ($p < 0,01$) para años con presencia del fenómeno y de 0,987 ($p < 0,05$) para años neutros (Figura 56, Anexo 1.2.6). Estos resultados indican que la relación entre las variables es alta (R^2 cercano a 1), debido a que en ambos casos más del 97% de los datos son representados por la regresión; positiva ($0 < R < 1$), por lo que al aumentar la temperatura se genera un incremento en la concentración de ozono; y significativa, ya que en ambos casos la probabilidad de error es inferior al 5%.

▪ La Florida

En la Figura 29, se puede observar que el comportamiento de la concentración de ozono en años sin presencia del fenómeno es similar a los años con El Niño, presentando concentraciones máximas entre los meses de enero y diciembre, las cuales están flanqueadas por las bajas concentraciones obtenidas para los meses de marzo y noviembre. Al comparar las series (con El Niño vs sin El Niño), es posible observar diferencias importantes entre los meses noviembre y diciembre, no así para el resto de los meses característicos en los cuales los promedios son bastante cercanos. No obstante, al contratar las medias, se determinó que no existen diferencias significativas entre estas ($p > 0,28$).

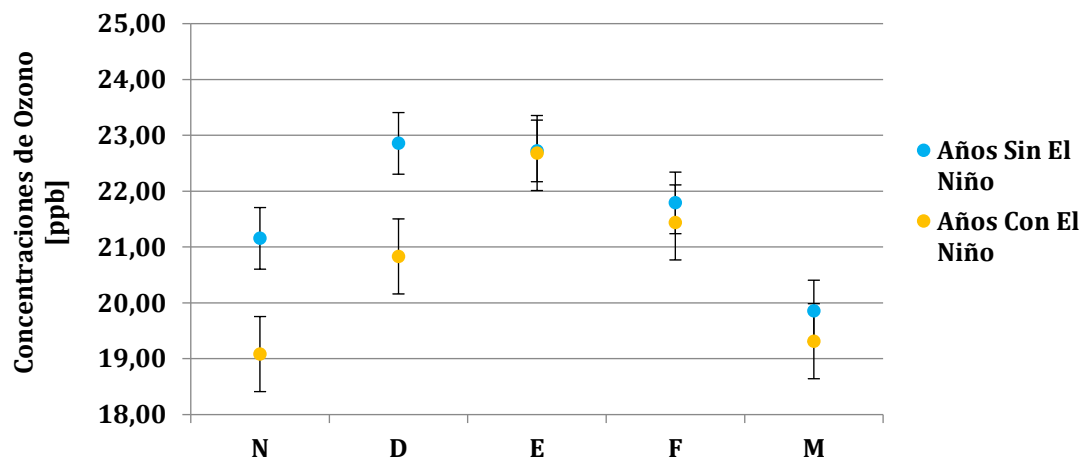


Figura 29, Comparación de meses característicos para años con y sin Niño, La Florida.
Fuente: Elaboración Propia.

Al igual que en Las Condes, las concentraciones de ozono se encuentran relacionadas con los promedios de temperatura, en este caso los coeficientes de correlación entre la temperatura y los años con y sin presencia del fenómeno fueron de 0,981 y 0,970, respectivamente. Estos valores indican que la variación en la temperatura estaría relacionada positivamente con el cambio en la concentración de ozono (Figura 57 del Anexo 1.2.6 Coeficientes de Correlación (R)).

▪ *Puente Alto*

En la comuna de Puente Alto, los resultados obtenidos para años con presencia del fenómeno mantienen la tendencia estacional, observada en los casos anteriores. Adicionalmente, es posible observar que en años neutros los niveles de ozono, en general, son inferiores a los obtenidos para años con presencia del fenómeno. No obstante, al comparar las medias se obtiene que no existen diferencias significativas ($p > 0,20$).

Por otra parte, los coeficientes de correlación entre la temperatura y las concentraciones de ozono obtenidos para Puente Alto para años neutros y con presencia de El Niño son de 0,958 y 0,947, respectivamente (Figura 58 del Anexo 1.2.6 Coeficientes de Correlación (R)).

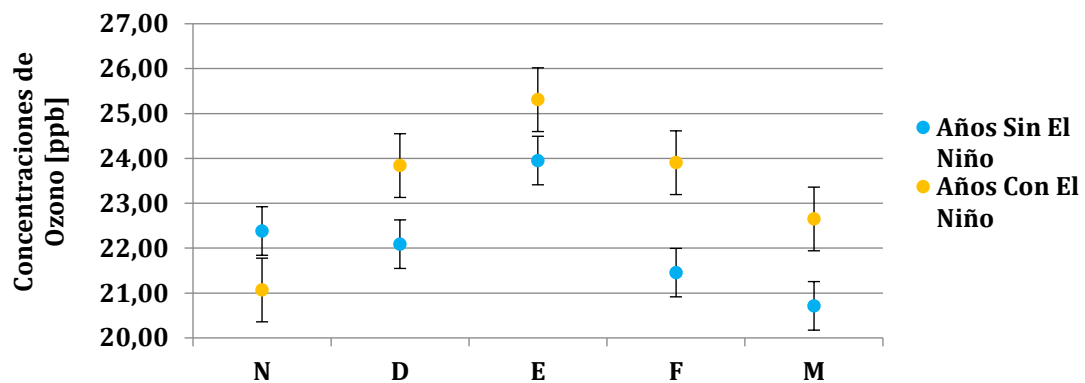


Figura 30, Comparación de meses característicos para años con y sin Niño, Puente Alto.
Fuente: Elaboración Propia.

La variación en los resultados, con respecto a las otras comunas, puede ser producto de la cercanía de la comuna con la cuenta del Río Maipo, lugar en donde se interrumpe uno de los cordones montañosos que rodea a Santiago (efecto chimenea), esto podría permitir una mayor ventilación de la zona y por ende una fluctuación de las concentraciones de contaminantes, sobre todo en periodos de verano cuando aumenta la inestabilidad atmosférica por un elevamiento de la capa de inversión (Garreaud y Rutlant, 2006).

▪ Observaciones generales.

La radiación solar promedio de la zona presenta los mayores valores durante el mes de diciembre y enero, estos son coherentes con los resultados obtenidos, en los cuales se puede evidenciar que los máximos de concentración de ozono se presentan durante estos meses. Los coeficientes de correlación entre la radiación solar y las concentraciones de ozono promedio de Las Condes, La Florida y Puente Alto son 0,973, 0,974 y 0,977, respectivamente. En todos los casos la correlación es significativa ($p < 0,001$). Esto además coincide con la relación entre las concentraciones de ozono y la temperatura ambiental. Entre las comunas, se puede apreciar que la comuna de Las Condes es la que presenta los mayores niveles de ozono.

Por otra parte, al comparar los años neutros con los años de El Niño, se determinó que para las tres comunas se acepta la hipótesis nula, es decir, no existen diferencias significativas entre las medias de años con y sin presencia del fenómeno, debido a que las probabilidades obtenidas superan el nivel de incerteza ($p > 0,05$).

Los resultados obtenidos coinciden con estudios realizados en Varanasi (Tiwari *et al.*, 2008), Estados Unidos (Cooper y Peterson, 2000), Canadá (Monks, 2000) y Europa (Varotsos *et al.*, 2001; Monks *et al.*, 2015), en donde se demostró que las concentraciones de ozono eran mayores durante los meses más cálidos. Adicionalmente, los niveles de ozono de Varanasi mostraban una alta correlación con los valores de temperatura registrados (Tiwari *et al.*, 2008). Adicionalmente, el aumento de concentración de ozono al aumentar la temperatura y la radiación solar estaría explicada por el aumento de la reacción de formación de O_3 a partir de NO_x durante los meses de verano (Logan, 1985; Hirsch *et al.*, 1996). Este resultado se atribuye principalmente al aumento de la temperatura, lo que favorecería la formación fotoquímica de ozono (Tiwari *et al.*, 2008). Con respecto a la influencia de El Niño, no existen investigaciones que demuestren que el fenómeno altere las concentraciones de ozono troposférico en latitudes medias.

- **Comparación entre tipos de Fenómenos de El Niño.**

Para determinar si existe alguna diferencia entre los efectos ocasionados por el fenómeno según su tipo, inicialmente se realizará una comparación gráfica considerando la variabilidad de los datos, con el fin de determinar si resultados presentan una tendencia similar. Adicionalmente, se compararán los años de El Niño Canónico y Modoki considerando tanto las medias anuales como las obtenidas en los meses característicos.

- *Las Condes*

En los tres casos evaluados se puede observar que la máxima concentración de ozono se presenta en el mes de enero. En general, los periodos de El Niño Modoki poseen las mayores concentraciones, a excepción del mes de noviembre que presento el valor más bajo. Además, se puede apreciar que la variabilidad de los promedios obtenidos para los eventos Canónicos, son similares a las presentadas por los años neutros.

Por otra parte, al comparar las medias anuales (enero a diciembre) de ambos eventos, se determinó que la probabilidad de que estas coincidan es de un 40,4%, por lo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para los dos tipos de El Niño. No obstante, al evaluar solo las medias en meses característicos, la probabilidad disminuye a

un 27,5%, la variación en la probabilidad puede ser producto de la disminución en los grados de libertad utilizados para el cálculo.

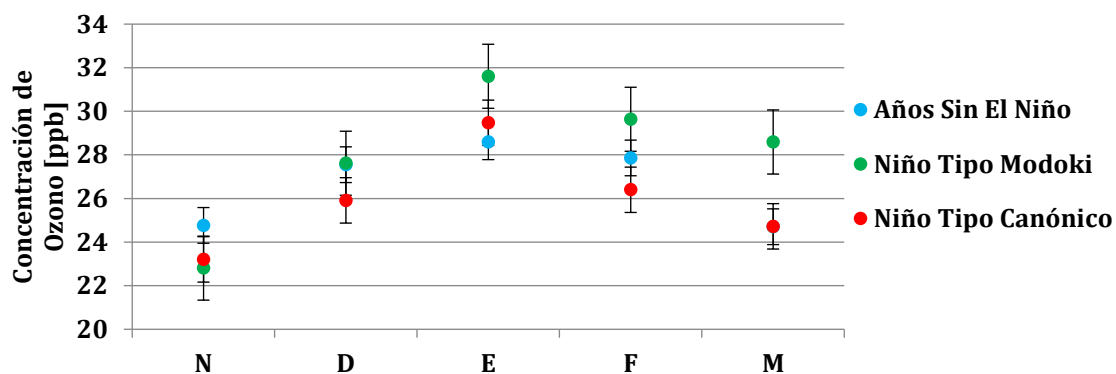


Figura 31, Comparación de años sin El Niño y años con El Niño por tipo, Las Condes.
Fuente: Elaboración Propia.

Al comparar los tipos de El Niño con los años neutros (en periodos característicos), se demostró que no existen diferencias significativas al comparar las medias tanto de El Niño Modoki con los años neutros ($p > 0,443$), como de El Niño Canónico con años sin presencia del fenómeno ($p > 0,585$). De estos resultados, se puede apreciar que los eventos Canónicos son los que presentan mayor similitud con los años neutros. Es importante señalar que entre 1997 y 2016 solo se han presentado dos eventos de El Niño Modoki y tres de El Niño Canónico, por lo que, estadísticamente, los resultados son poco representativos del fenómeno.

▪ *La Florida*

Desde la Figura 32, se puede observar que las máximas concentraciones se encuentran en los meses de enero y diciembre. Adicionalmente, se puede mencionar que, a diferencia de lo observado en Las Condes, en la mayoría de los casos las variabilidades de los resultados obtenidos para El Niño Canónico no coinciden con las obtenidas para años sin presencia del fenómeno.

Por otra parte, al comparar las medias anuales (enero a diciembre) de ambos eventos, se determinó que la probabilidad de que estas coincidan es de un 35,7%, por lo que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos para los dos tipos de El Niño. Sin embargo, al evaluar solo los meses característicos, la probabilidad disminuye a un 2,7%,

esto indica que la hipótesis nula es falsa y, por ende, las medias para ambos tipos de El Niño si presentan diferencias significativas.

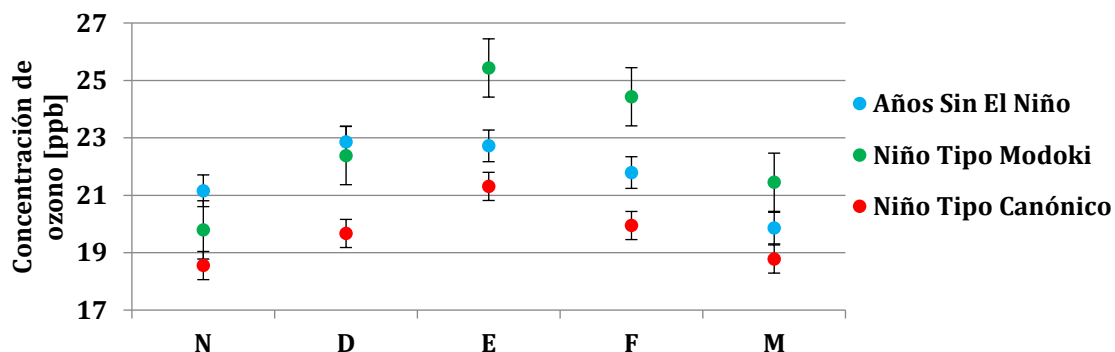


Figura 32, Comparación de años sin El Niño y años con El Niño por tipo, La Florida.
Fuente: Elaboración Propia.

Al comparar los tipos de El Niño con los años neutros (en periodos característicos), se demostró que no existen diferencias significativas al comparar las medias tanto de El Niño Modoki con los años neutros ($p > 0,466$), como de El Niño Canónico con años sin presencia del fenómeno ($p > 0,937$). Al igual que en la comuna de Las Condes, se puede apreciar que los eventos Canónicos son los que presentan mayor similitud con los años neutros. Es importante señalar que entre 1997 y 2016 solo se han presentado dos eventos de El Niño Modoki y tres de El Niño Canónico, por lo que, estadísticamente, los resultados son poco representativos del fenómeno.

▪ *Puente Alto*

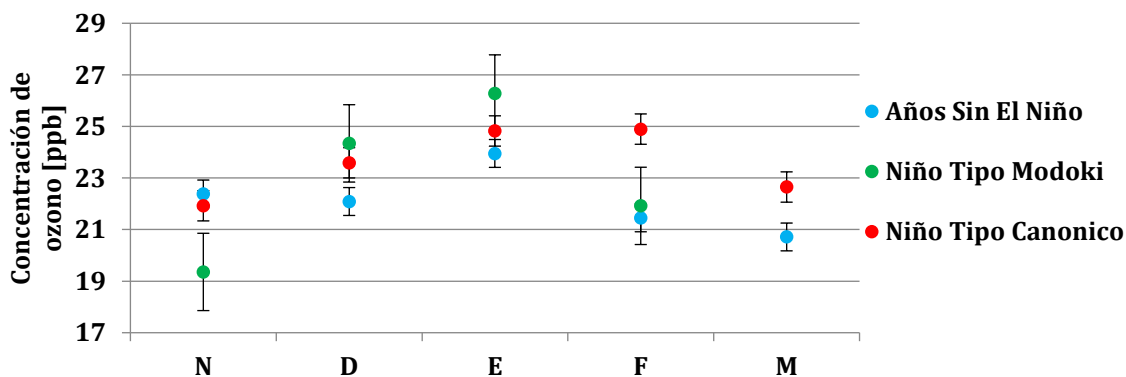


Figura 33, Comparación de años sin El Niño y años con El Niño por tipo, Puente Alto.
Fuente: Elaboración Propia.

En Puente Alto se observa una tendencia similar a la presentada en las comunas anteriores, en este los máximos se encuentran entre enero y febrero. Adicionalmente, es posible observar que los resultados para El Niño Modoki presentan una mayor variabilidad en comparación a los eventos Canónicos y los años neutros.

Por otra parte, no fue posible evaluar la diferencia de las medias, debido que para esta comuna solo se cuenta con información desde el año 2009, por lo que solo se ha registrado un evento de cada tipo.

- *Observaciones generales*

Al comparar los resultados obtenidos entre las comunas, se observa que Las Condes es la que presenta los mayores niveles de ozono para ambos eventos de El Niño, estos resultados son coherentes con los presentados anteriormente.

Al evaluar la igualdad de medias (anuales y en periodos característicos), entre eventos de El Niño, se determinó que la comuna de Las Condes no presenta diferencias significativas en ninguno de los casos ($p > 0,05$). Por otra parte, La Florida no presentaba diferencias significativas entre sus medias anuales ($p > 0,05$), pero al compararlas en periodos característicos se la hipótesis nula fue rechazada, lo que se traduce en diferencias significativas entre las medias ($p < 0,05$). Adicionalmente, la evaluación de las medias entre años neutros con los dos tipos de El Niño se determinó que en todos los casos las diferencias no son significativas ($p > 0,40$). Por lo tanto, no se aprecian fluctuaciones en las concentraciones de ozono en presencia del fenómeno.

Con respecto al comportamiento de las concentraciones, es posible apreciar la estacionalidad de los niveles de ozono. Estos resultados son consistentes con el comportamiento estacional del ozono (Tiwari *et al.*, 2008; Logan, 1985; Hirsch *et al.*, 1996; Monks 2000; Monks *et al.*, 2015; Cooper y Peterson, 2000; Varotsos *et al.*, 2001). Por otra parte, no existen estudios que revelen el comportamiento específico de cada tipo de fenómeno de El Niño, en las concentraciones de ozono troposférico en regiones cercanas a la latitud 30°, ya sea norte o sur.

4.3.3. Promedios de Concentraciones en Horas Características.

Para el fin de facilitar la discusión de los resultados, se elaboró la Tabla 7, en la cual se reportan los meses característicos, según el orden decreciente de promedios de temperaturas (para tres horas del día), concentración de óxidos de nitrógeno y la radiación incidente.

Tabla 7, Comparación entre meses los parámetros utilizados para el análisis, ordenando de mayor a menor.
Fuente: Elaboración propia.

Temperaturas *			1[NO _x] Las Condes**	[NO _x] La Florida **	[NO _x] Puente Alto **	Radiación ***
8:00	14:00	20:00				
Enero	Enero	Enero	Marzo	Noviembre	Marzo	Diciembre
Diciembre	Diciembre	Febrero	Noviembre	Marzo	Febrero	Enero
Febrero	Febrero	Diciembre	Diciembre	Enero	Noviembre	Noviembre
Noviembre	Marzo	Marzo	Febrero	Diciembre	Enero	Febrero
Marzo	Noviembre	Noviembre	Enero	Febrero	Diciembre	Marzo

*: Resultados en Figura 51, Anexo 1.2.1

**.: Resultados en Figura 53, 54 y 55, Anexo 1.2.5

***: Resultados en Figura 23, Punto 4.2 Periodos Característicos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las tres comunas durante años con y sin presencia del fenómeno.

▪ Las Condes

En noviembre, se observa que la tendencia para ambos casos es la misma, con un incremento de las concentraciones hasta llegar a su valor máximo a las 13 horas, punto desde el cual decrece. Este mes, junto con marzo, son los que presentan la menor temperatura a las 8 horas (Tabla 7), lo que podría explicar que ambos meses registren las menores concentraciones a las 9 de la mañana. Las bajas temperaturas pueden ser provocadas por una disminución en la radiación incidente. Esto coincide con elevados niveles de NO_x, lo que también justifica la reducción en la tasa de formación de ozono. Por otra parte, a las 13 horas se alcanza el máximo en las concentraciones de ozono, lo que concuerda con el aumento de las temperaturas durante la tarde. Al comparar los años con y sin presencia del fenómeno, se determinó que la diferencia entre las medias es de 4,27 ppb y que esta diferencia no es significativa ($p>0,54$).

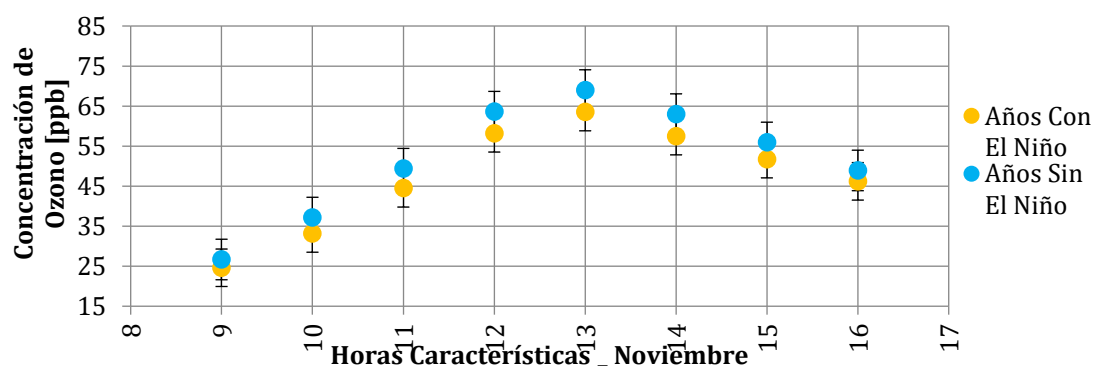


Figura 34, Promedio de Horas Características, Mes de Noviembre.
Fuente: Elaboración Propia.

El mes de diciembre presentan una tendencia similar al mes de noviembre, con un aumento de las concentraciones desde las 9 horas, hasta llegar a un máximo durante el medio día para finalmente decrecer durante las horas de la tarde. En comparación al mes de noviembre, en general, las concentraciones horarias de ozono han presentado un leve incremento lo que puede ser resultado del aumento de radiación incidente durante este periodo. Por otra parte, la leve diferencia presentada durante el mes de noviembre ha sido minimizada, llegando incluso al solapamiento de los valores obtenidos. La mayor diferencia fue de 3,8 ppb a las 11 horas, este valor forma parte del rango de variabilidad de los resultados obtenidos tanto para años neutros como con El Niño. Por otra parte, al comparar las medias no se encontraron diferencias significativas ($p > 0,79$).

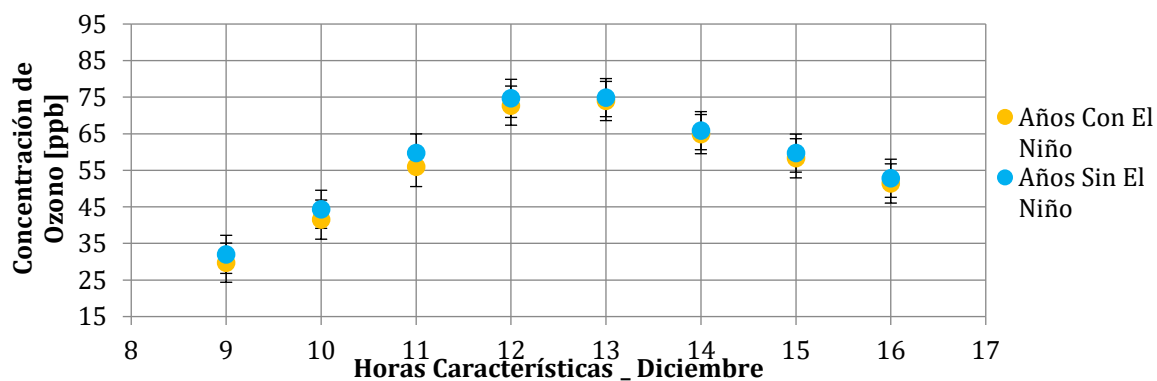


Figura 35, Promedio de Horas Características, Mes de Diciembre.
Fuente: Elaboración Propia.

El alza en las concentraciones de ozono coincide con un aumento en la temperatura durante la mañana, lo que además de incrementar el flujo ascendente aire, aumentando la altura de inversión térmica y por ende la disponibilidad de precursores en el piedemonte,

este aumento de las temperaturas puede ser producto del aumento de la radiación incidente, factores que en conjunto estarían generando una mayor síntesis de ozono a partir de NO_x .

Enero mantiene la tendencia anteriormente presentada, pero en este caso los valores obtenidos para las concentraciones de ozono se invierten, es decir, en comparación al mes de noviembre, las concentraciones de los años con presencia del fenómeno son levemente superiores a los valores obtenidos para años neutros, presentando la mayor diferencia a las 13 horas con un valor de 4,9 ppb, valor incluido en el rango de variabilidad de los resultados. Por otra parte, al comparar las medias se obtuvo una diferencia de 2,47 ppb la cual no es suficiente para establecer alguna variación importante entre los años con y sin presencia del fenómeno ($p>0,77$). Este mes presenta las mayores temperaturas, una alta radiación y una baja concentración de NO_x , lo que en su conjunto explica que en general posea las mayores concentraciones de ozono, en comparación a los meses evaluados.

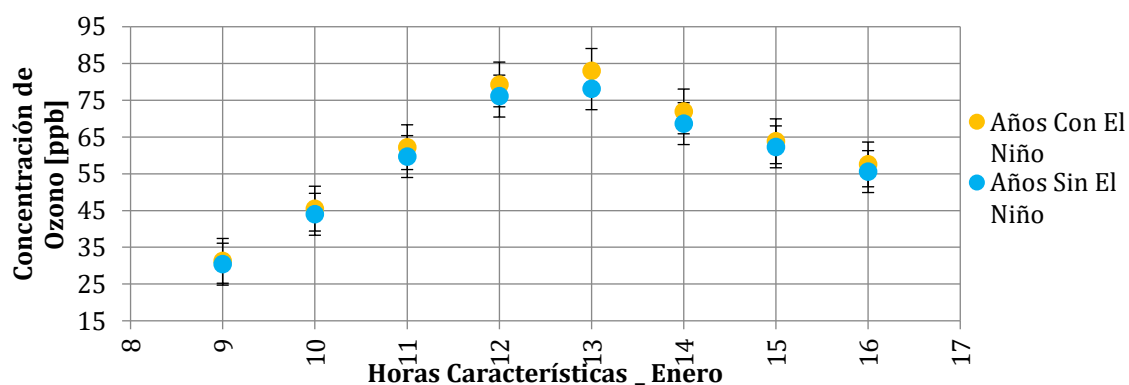


Figura 36, Promedio de Horas Características, Mes de Enero.
Fuente: Elaboración Propia

Durante febrero se puede observar una tendencia creciente desde las 9 a las 13 horas, para posteriormente decrecer de manera más pausada. Con respecto a la comparación entre años neutros y con El Niño, no se aprecian mayores diferencias entre los valores obtenidos, este escenario es similar al exhibido durante el mes de diciembre, ya que a diferencia del mes de enero las concentraciones para años sin presencia del fenómeno son levemente superiores a las obtenidas para años con presencia de El Niño. La diferencia entre los resultados no significativa ($p>0,84$). En comparación a las concentraciones observadas

para los meses anteriores, los resultados obtenidos para febrero son inferiores al mes de enero y superiores a los meses de diciembre y noviembre.

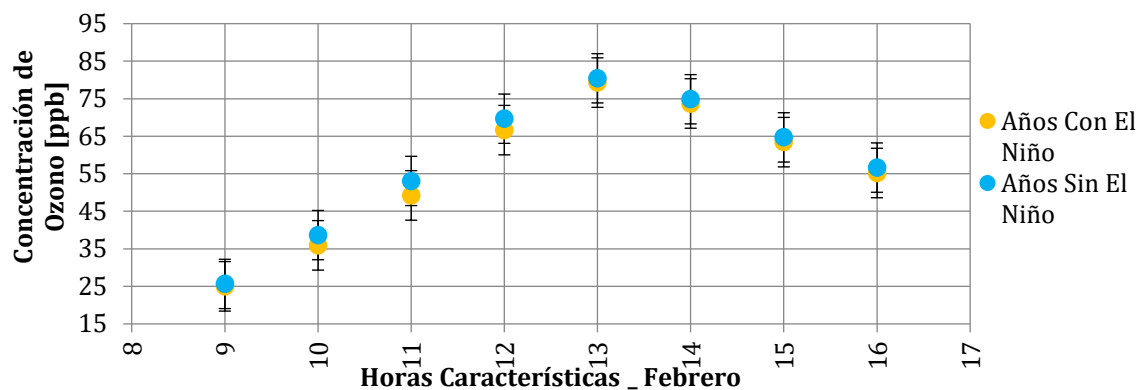


Figura 37, Promedio de Horas Características, Mes de Febrero.
Fuente: Elaboración Propia.

Febrero en comparación a enero y diciembre presenta una menor temperatura matutina, la que puede ser producto de la disminución en la radiación incidente durante las horas de la mañana, esto podría estar ocasionando la disminución en las concentraciones de ozono durante la mañana (Stathopoulou *et al.*, 2008). Por otra parte, durante la tarde la concentración de ozono se eleva, lo que podría ser resultado del alza en la temperatura.

En marzo la tendencia para los años con y sin presencia del fenómeno es la misma y esta a su vez es similar a los meses anteriores, la máxima concentración se observa a las 14 horas, a diferencia de los otros meses donde el máximo se localizaba frecuentemente entre las 12 y 13 horas. Por otra parte, no se aprecian variación entre los años con y sin presencia del fenómeno, la diferencia de las medias es de 0,63 ppb y no es significativa ($p > 0,95$).

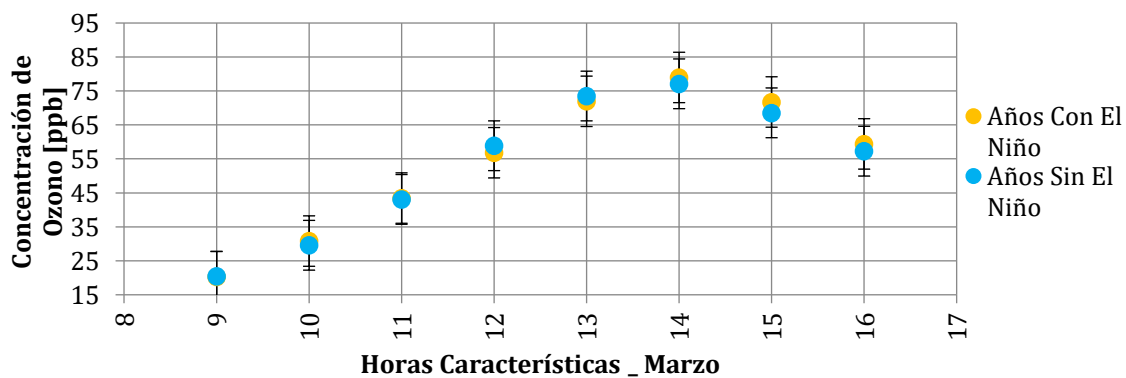


Figura 38, Promedio de Horas Características, Mes de Marzo.
Fuente: Elaboración Propia.

El mes de marzo es uno de los que registra la menor temperatura a las 8 horas, lo que coincide con la menor concentración matutina de ozono, en comparación con los otros meses. Adicionalmente, este es el mes que recibe menor radiación, motivo que podría explicar que tenga bajas concentraciones de ozono y un aumento de la concentración de NO_x (Stathopoulou *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 1978).

▪ La Florida

En noviembre la tendencia presenta un aumento de la concentración hasta llegar a un máximo al medio día, posteriormente se genera un descenso paulatino de las concentraciones. Con respecto a la presencia del fenómeno se puede mencionar que las concentraciones son levemente inferiores a las presentadas durante los años neutros, al comparar las medias se obtiene una diferencia de 4,88 ppb la cual no es significativa ($p>0,28$).

En comparación al mismo mes, pero en la comuna de Las Condes se puede observar que no existe un máximo pronunciado y que las concentraciones son inferiores. Esta diferencia, no se debe a la falta de precursores, ya que esta es la comuna que posee los mayores niveles de NO_x. No obstante, su ubicación (entre la depresión intermedia y el piedemonte) hace que la radiación incidente en la zona sea levemente inferior, a la presentadas en Las Condes, disminuyendo la fotoquímica de formación de ozono. Adicionalmente, durante la primavera aumenta la intensidad de los vientos del SO, lo cual mejoraría la dispersión de contaminantes hacia sectores más cordilleranos (Garreaud y Rutlant, 2006).

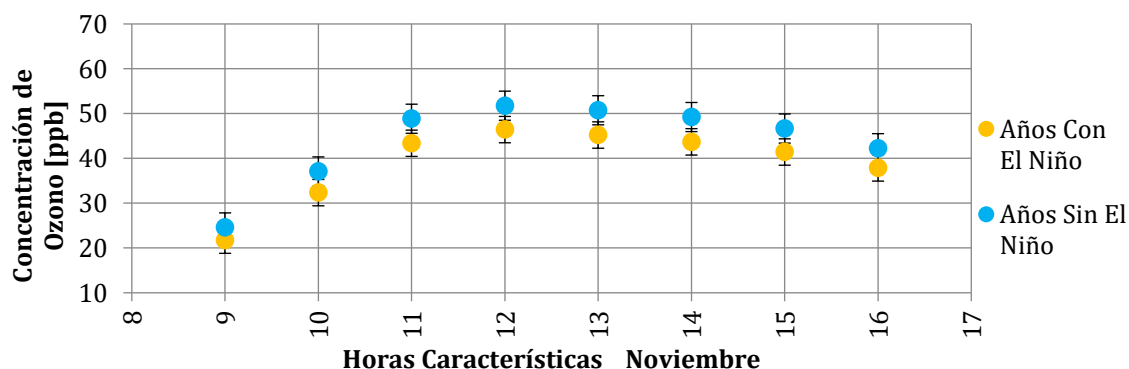


Figura 39, Promedio de Horas Características, Mes de Noviembre La Florida.
Fuente: Elaboración Propia.

La tendencia del mes de diciembre es similar a la presentada por en noviembre, pero con una mayor pendiente. Adicionalmente, el máximo se ha desplazado a las 11 horas y desde este comienza a disminuir lentamente. Al contrastar los resultados de años neutros con los años de El Niño, se puede apreciar que los resultados son similares, la diferencia entre las medias es de 3,42 ppb y no es significativa ($p>0,43$). En comparación al mismo mes en la comuna de Las Condes se puede observar que en general los niveles de ozono para esta comuna son inferiores.

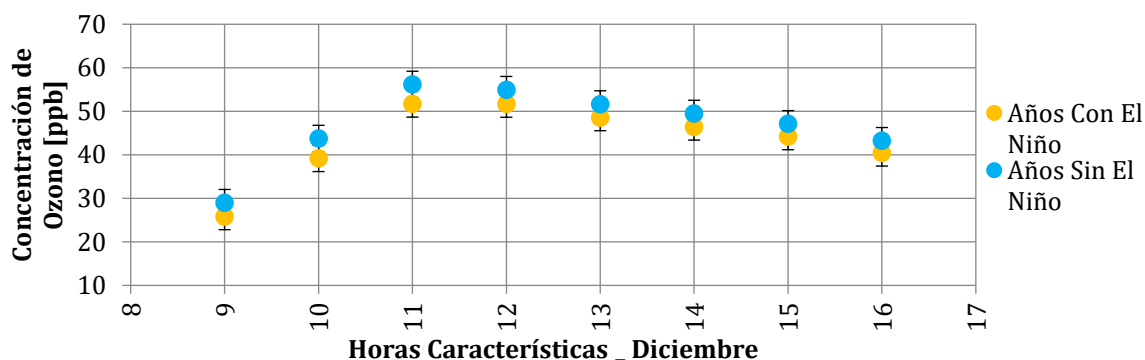


Figura 40, Promedio de Horas Características, Mes de Diciembre La Florida.
Fuente: Elaboración Propia.

Durante el mes de diciembre la radiación es mayor que en noviembre, esto explicaría el aumento en la concentración. No obstante, a diferencia de la comuna de Las Condes, los niveles de ozono no son tan elevados, esto puede ser producto de la dispersión de los contaminantes producto de la movilidad ejercida por los vientos que se dirigen a la cordillera (Garreaud y Rutlant, 2006).

El mes de enero, posee una tendencia similar a la presentada en diciembre, con un máximo a las 12 del día. En comparación al mismo mes en Las Condes se puede observar que las concentraciones en general son inferiores. Además, posterior al máximo es posible apreciar un decrecimiento más lento de los niveles de ozono, en comparación al mismo mes en la comuna de Las Condes. Al comparar las medias de años con El Niño con años neutros, se determinó que no existen diferencias significativas ($p>0,89$) entre los periodos evaluados.

En comparación a los meses anteriores, enero posee los niveles más altos de ozono por la tarde, lo que puede ser producto del aumento en la radiación incidente en la zona y de la

temperatura ambiente durante las horas de la tarde. Tanto la temperatura como la radiación se encuentran relacionados con la disminución en la concentración de NO_x .

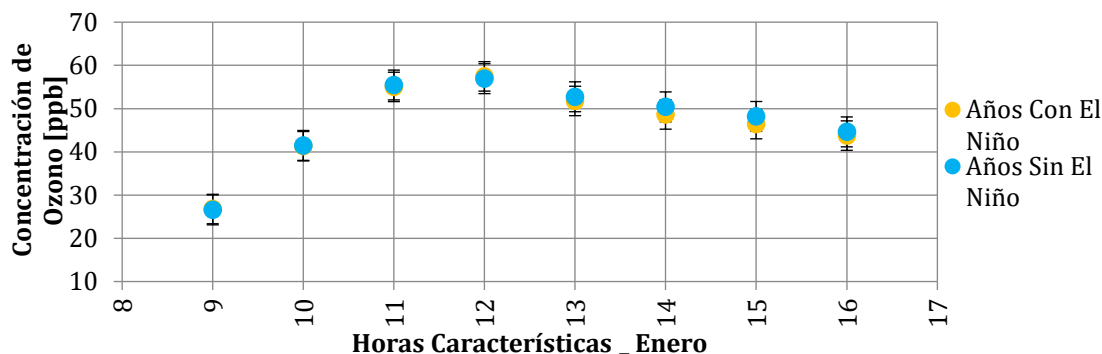


Figura 41, Promedio de Horas Características, Mes de Enero La Florida
Fuente: Elaboración Propia.

Febrero en contraste con el mes de enero, presenta una menor concentración a las 9 de la mañana, además de un pronunciamiento del máximo, a las 12 horas. En comparación a la comuna de Las Condes, durante el mismo mes, se puede apreciar que las concentraciones de O_3 son inferiores. Por otra parte, al evaluar la diferencia de las medias entre años con y sin El Niño, se determinó que la variación no era significativa ($p > 0,71$).

En febrero las temperaturas matutinas son inferiores a las presentadas en el mes de enero, lo que se genera debido al mayor enfriamiento de la superficie durante la noche, esta pérdida de temperatura es compensada durante las horas de la tarde. La variación térmica durante la noche explica las bajas concentraciones de ozono durante la mañana y el posterior aumento del nivel durante la tarde (Stathopoulou *et al.*, 2008). A la modificación en la temperatura, se suma la disminución en la radiación solar y como producto el aumento de la concentración de NO_x .

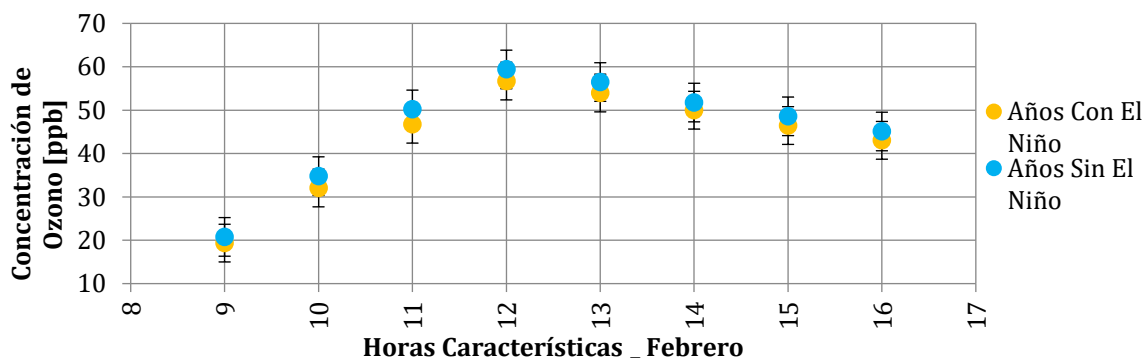


Figura 42, Promedio de Horas Características, Mes de Febrero La Florida.

Fuente: Elaboración Propia.

En marzo la tendencia observada es similar a la presentada por los meses anteriores, con un máximo de concentración a las 13 horas, en contraste con el mes de febrero, el nivel de ozono a las 9 horas es inferior. Por otro lado, se determinó que no existen diferencias significativas ($p>0,67$) entre las medias de años neutros y años con presencia de El Niño.

Durante el mes de marzo se presenta la menor radiación, de los periodos característicos, esto coincide con un aumento en las concentraciones de NO_x , lo que se relaciona con una disminución en la formación de ozono. Por otra parte, el nivel de ozono durante las 9 horas es inferior al presentado en febrero, esto podría ser causado por una disminución de la capa de mezcla durante la noche y la madrugada (inversión térmica de radiación), la cual con el transcurso del día aumenta con el incremento de la radiación solar (Garreaud y Rutlant, 2006).

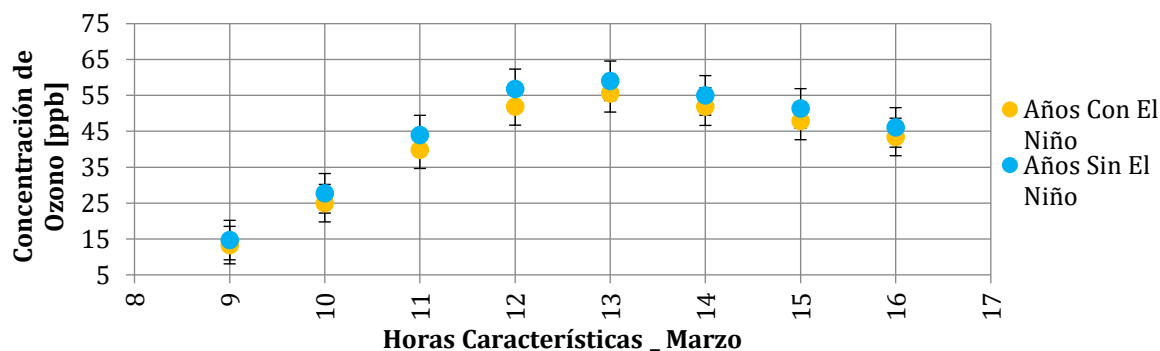


Figura 43, Promedio de Horas Características, Mes de Marzo La Florida.
Fuente: Elaboración Propia.

▪ Puente Alto

En la gráfica se puede observar, que los promedios obtenidos para el mes de noviembre presentan una tendencia incremental entre las 9 y las 13 horas del día, después de las cuales comienzan a disminuir. Comparando estos resultados con los observados para el mismo mes en las dos comunas ya analizadas, se puede apreciar que la concentración de esta comuna es la menor, a pesar de que se encuentre ubicada en el piedemonte de la cuenca. Por otro lado, al contrastar los años neutros con los de El Niño, se observa que los resultados obtenidos para años sin el fenómeno se encuentran por sobre los obtenidos

para los años con presencia de El Niño, la diferencia entre las medias es de 2,83 ppb y no es significativa ($p>0,42$).

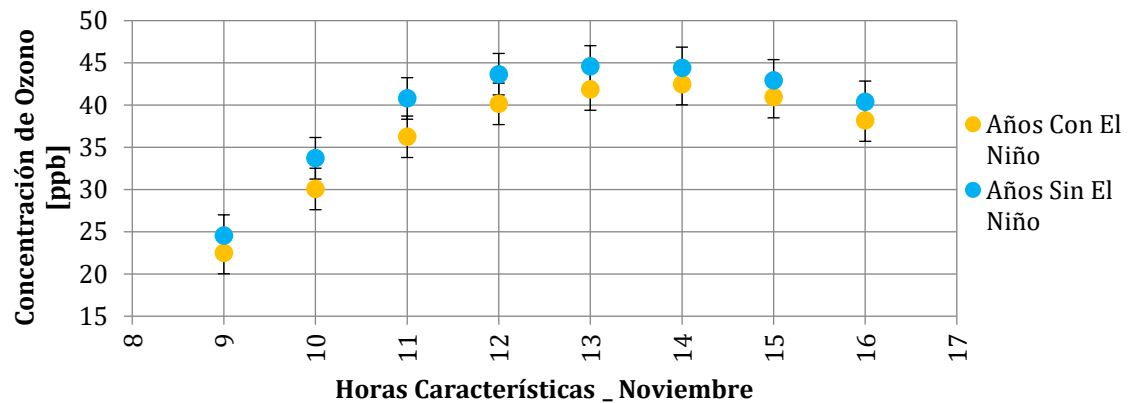


Figura 44, Promedio de Horas Características, Mes de Noviembre Puente Alto.
Fuente: Elaboración Propia.

Durante noviembre las concentraciones de ozono son bajas aun no llegan a su punto máximo, el cual está relacionado con los máximos de radiación y temperatura.

La tendencia presentada por el mes de diciembre es similar a la observada en noviembre, con un incremento de las concentraciones. Adicionalmente, la curva generada por los datos tiene una forma menos pronunciada, debido a un ascenso y descenso más paulatino de los niveles de ozono durante el día. Con respecto a la influencia del fenómeno, se puede observar que los años con El Niño presentan valores levemente superiores en comparación a los años neutros, la diferencia entre sus medias es de 3,04 ppb ($p>0,36$) y no es suficiente para establecer que existe influencia del fenómeno en los resultados.

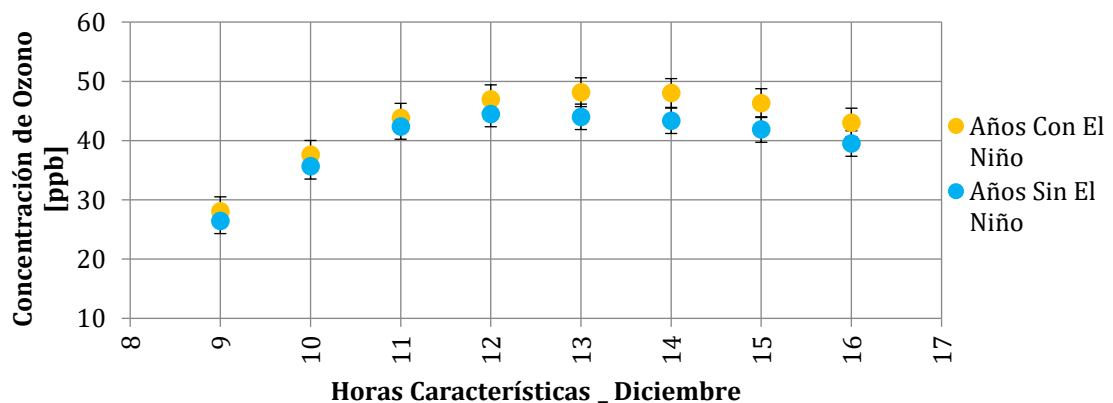


Figura 45, Promedio de Horas Características, Mes de Diciembre Puente Alto.
Fuente: Elaboración Propia.

Durante el mes de diciembre aumenta la radiación incidente y la temperatura ambiental, esto incide en la tasa de formación de ozono, lo que además se relaciona con la disminución en las concentraciones de NO_x .

En enero las concentraciones son levemente superiores a las presentadas en los meses anteriores. Con respecto a la presencia del fenómeno, se puede apreciar que la diferencia entre los años con y sin fenómeno es mínima, en comparación a los otros meses estudiados, no presenta grado de significancia ($p>0,59$). En contraste con los valores obtenidos para el mismo mes en comunas en las otras comunas, se puede observar que en Puente Alto las concentraciones son inferiores.

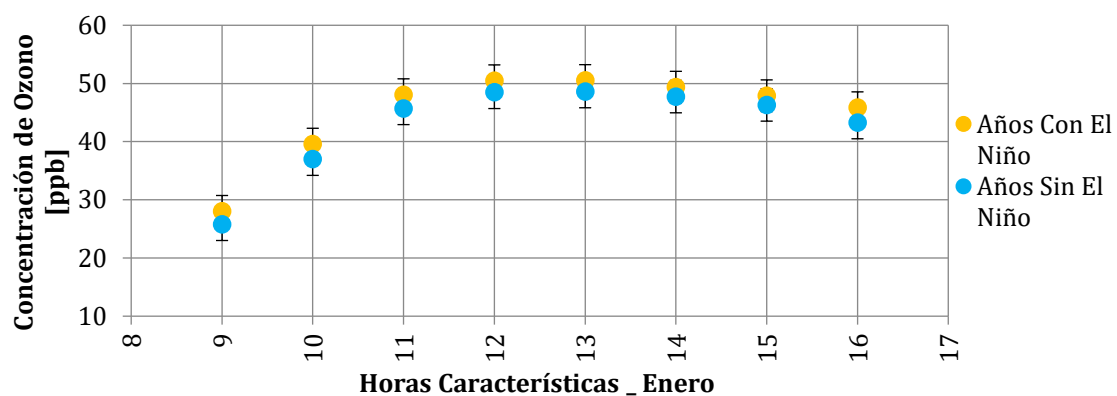


Figura 46, Promedio de Horas Características, Mes de Enero Puente Alto
Fuente: Elaboración Propia.

Junto con diciembre, enero es el mes en donde se presenta la mayor radiación incidente, esto además coincide con la disminución en la concentración de NO_x . El incremento en la formación de ozono está relacionado directamente con la descomposición fotoquímica de los precursores (NO_x).

En febrero, se puede observar que la tendencia es similar a los meses anteriores. Por otro lado, las concentraciones obtenidas son levemente menores a las apreciadas en el mes de enero. En contraste con las comunas anteriores, se puede apreciar que los niveles de O_3 en febrero son inferiores. Por otra parte, al comparar los años neutro con los años de El Niño, se puede observar que estos últimos registran una mayor concentración de ozono. Adicionalmente, se determinó que la diferencia entre las medias es de 3,50 ppb ($p>0,45$) y que no es significativa para establecer alguna influencia del fenómeno en los niveles del contaminante.

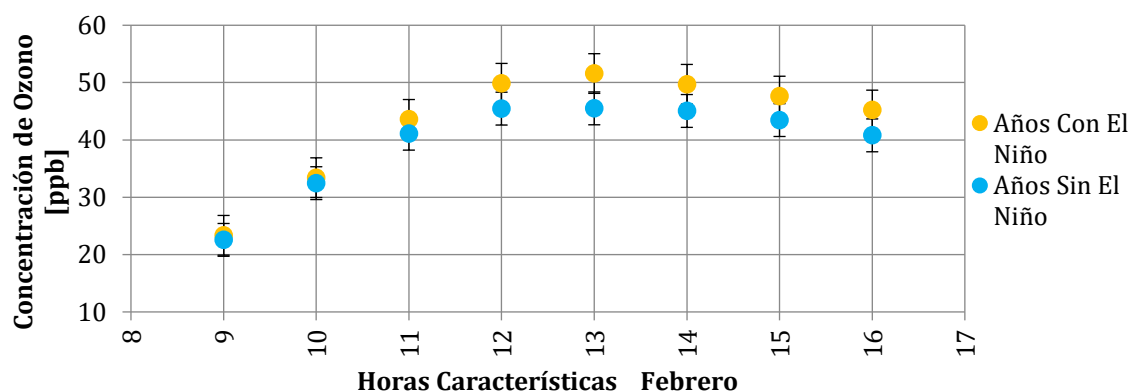


Figura 47, Promedio de Horas Características, Mes de Febrero Puente Alto.
Fuente: Elaboración Propia.

Febrero muestra una disminución en la concentración de ozono, esto puede ser producto de la disminución en la radiación incidente, este resultado coincide con un alza en las concentraciones de NO_x , lo que es coherente con los resultados.

Marzo presenta una tendencia similar al mes de febrero, con concentraciones matutinas inferiores a las observadas durante el mes anterior. En comparación a las otras comunas, se puede apreciar que la concentración en Puente Alto, en el mismo periodo, es inferior. Por otra parte, al comparar los años neutros con los de El Niño, se determinó que no existen diferencias importantes entre sus medias ($p > 0,74$).

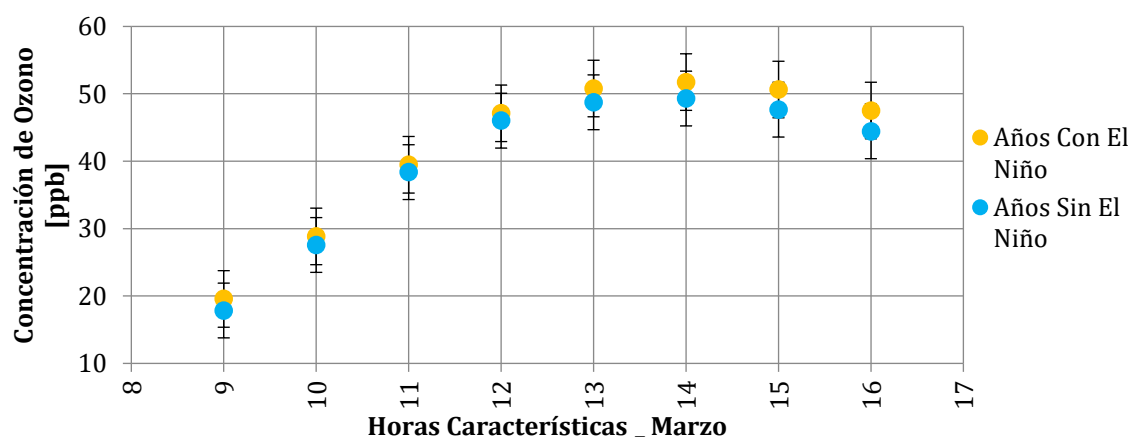


Figura 48, Promedio de Horas Características, Mes de Marzo Puente Alto
Fuente: Elaboración Propia.

La disminución en las concentraciones de ozono puede ser producto de la disminución en la radiación incidente, la cual está acompañada del alza de las concentraciones de NO_x (Stathopoulou *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 1978).

■ *Observaciones generales*

En general el comportamiento de las concentraciones de ozono, durante el periodo de estudio, se relaciona directamente con la radiación solar incidente, las temperaturas observadas durante el día y la disminución en las concentraciones de NO_x . Particularmente, se observó que los máximos de concentración se alcanzaban entre las 12 y las 14 horas, lo que coincide con los mayores índices de radiación solar y con las temperaturas observadas, mientras que durante las primeras horas del día las concentraciones de O_3 eran relativamente bajas. Estos resultados se justifican en el hecho de que durante las mañanas las temperaturas son inferiores, lo que no favorece la formación fotoquímica de O_3 , mientras en la tarde incrementa temperatura, lo que coincide con los máximos valores de ozono.

La comuna de Las Condes es, en general, la que presenta los mayores niveles de ozono, seguida por La Florida y finalmente por Puente Alto. Las bajas concentraciones presentadas Puente Alto, a pesar de que se encuentra mayormente en el piedemonte, puede ser por la presencia de la cuenca hidrográfica del Río Maipo, al sur de la comuna, lo que mejora la ventilación de la zona, mejorando la depuración de la atmósfera (Garreaud y Rutlant, 2006).

Como se ha mencionado anteriormente, la formación fotoquímica de ozono se encuentra estrechamente relacionada a la temperatura y a la radiación solar, motivo por el cual las mayores concentraciones de ozono se registran durante los meses de verano (Tiwari *et al.*, 2008; Cooper y Peterson, 2000; Monks *et al.*, 2015). Esta información se encuentra relacionada con la presencia de máximos en los niveles de ozono entre las 12 y las 14 horas, periodo en que se registran las mayores temperaturas (Tiwari *et al.*, 2008).

4.3.4. Concentraciones de NO_x

Las concentraciones de óxidos de Nitrógeno, durante los años con o sin presencia del fenómeno, no presentan diferencias por lo cual no se puede concluir que estas experimentan alguna modificación durante los periodos de El Niño.

Como se esperaba, las concentraciones de NO_x disminuyen durante los meses característicos, lo cual puede ser producto de la disociación generada por el aumento de la

radiación global. Estas disminuciones en la concentración de NO_x coincide con el incremento de la concentración de Ozono troposférico, en las comunas estudiadas. Los gráficos demostrativos se encuentran en el Anexo 1.2.5. Al estudiar la correlación de las concentraciones de NO_x con los niveles de ozono, se obtienen coeficientes que oscilan entre los $R=-0,91$ y $R=-0,98$, lo que confirma la relación negativa que existe entre ambos contaminantes, de estos resultados se puede inferir que al disminuir en 1 ppb las concentraciones promedio de NO_x el nivel de ozono aumenta en promedio 0,95 ppb Anexo 1.2.6. En investigaciones anteriores, se ha demostrado que el comportamiento estacional del ozono se encuentra estrechamente relacionado con las fluctuaciones estacionales de la concentraciones de NO_x (Hirsch *et al.*, 1996).

Adicionalmente, se observó que las concentraciones de NO_x en La Florida son mayores que en Las Condes y Puente Alto, este resultado puede ser producto de la altura a la que se encuentra la comuna, debido a que esta se encuentra entre la depresión intermedia y el piedemonte, mientras que las otras dos comunas se encuentran totalmente ubicadas en el piedemonte, lugar que se caracteriza por estar expuesta a una mayor insolación y ubicarse por sobre la capa de inversión durante los meses de invierno.

4.3.5. Influencia de las precipitaciones.

Los estudios de las precipitaciones desde el año 1997 al 2016, en las comunas de estudio, no mostraron diferencias significativas en la cantidad de lluvias durante los periodos de El Niño, en los meses característicos, por lo que los posibles efectos de las precipitaciones, en las concentraciones de ozono, para estos periodos pueden ser descartados. Las precipitaciones promedio por comuna, se encuentran resumidas en los gráficos del Anexo 1.2.3.

Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones.

5.1. Conclusiones.

- En todos los casos evaluados el ozono presenta un comportamiento estacional, con máximos en verano y mínimos en invierno.
- Durante los meses y horas característicos, los niveles de ozono en años neutros no presentan diferencias importantes con las medias de años con presencia del fenómeno ($p>0,05$).
- Las medias de ozono en periodos neutros no presentan diferencias significativas con los resultados obtenidos durante eventos de El Niño Modoki ($p>0,05$).
- Las medias de ozono en periodos neutros no presentan diferencias significativas con los resultados obtenidos durante eventos de El Niño Canónico ($p>0,05$).
- En base a los resultados obtenidos, no es posible atribuir algún efecto del fenómeno en los niveles de ozono troposférico de Santiago.
- El ozono muestra una respuesta lineal y positiva a los incrementos de temperatura, con coeficientes de correlación por sobre 0,950. Resultado que se encuentra relacionado con la estacionalidad del contaminante.
- Las disminuciones en las concentraciones de óxidos de nitrógeno se encuentran relacionadas con incrementos en los niveles de ozono. Es decir, se relacionan lineal y negativa ($R<-0,944$).
- La relación de los niveles de ozono con el incremento de la temperatura y la disminución en la concentración de NO_x , son indicios claros de la fotoquímica de formación de ozono.
- Los niveles de ozono en la comuna de Puente Alto podrían estar influenciados por los vientos del SO, los cuales circulan sobre el cauce principal del Río Maipo generando una mayor dispersión de los contaminantes.

5.2. Recomendaciones

- Evaluar si la intensidad con que se presenta el fenómeno de El Niño genera alguna modificación en las concentraciones de ozono troposférico.

- Incorporar el patrón de vientos de la cuenca, y verificar si estos son modificados por el fenómeno.
- Incorporar la influencia de la humedad y los COVs en las concentraciones de ozono de la cuenca.

Capítulo 6. Referencias

- AIDA, 2012: *Air Quality in Latin America: An Overview*. 1-6 pp.
- Ashok, K., S. K. Behera, S. A. Rao, H. Weng, and T. Yamagata, 2007: El Niño Modoki and its Possible Teleconnection. *J. Geophys. Res. Ocean.*, **112**, 1–27.
- Atkinson, R., 2000: Atmospheric chemistry of VOCs and NO(x). *Atmos. Environ.*, **34**, 2063–2101.
- Biblioteca Nacional de Chile, 2015: Memoria Chilena: La contaminación atmosférica de Santiago. *Mem. Chil.*, <http://www.memoriachilena.cl/602/w3-article-3507.html#ui-accordion-tabs-header-4> (Accedió June 11, 2016).
- Brenes Rodriguez, C., 2014: *Fenómeno de El Niño, estado actual y sus posibles impactos sobre algunos sectores productivos de América Latina*. 26 pp.
- Carrasco, J. F., and J. Quintana, 2004: *Descripción de las condiciones atmosféricas observadas en Chile durante 1997-2000 asociadas a El Niño-La Niña, Oscilación del Sur*. 43-59 pp.
- Chandra, S., J. R. Ziemke, W. Min, and W. G. Read, 1998: Effects of 1997 - 1998 El Niño on tropospheric ozone and water vapor. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3867–3870.
- Cooper, S. M., and D. L. Peterson, 2000: Spatial distribution of tropospheric ozone in western, USA. *Environ. Pollut.*, **107**, 339–347.
- Corral, M., 2014: Caracterización de la estructura térmica de la atmósfera en la cuenca de Santiago de Chile y su relación con la calidad del aire. Universidad de Chile, .
- Crutzen, P., 1974: Photochemical reactions initiated by and influencing ozone in unpolluted tropospheric air. *Tellus A*, **26**, 47–57. <http://tellusa.net/index.php/tellusa/article/viewFile/9736/11359>.
- DGA, 2016: Datos Hidrológicos en Tiempo Real. *Minist. Obras Públicas*, <http://www.dga.cl/servicioshidrometeorologicos/Paginas/default.aspx> (Accedió September 5, 2016).
- DGAC, 2015: *Anuarios Climatológicos desde 1997 al 2015*. Santiago de Chile, 237 pp.
- D.S. N°12: *Establece norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable MP2,5*. Diario Oficial de la Republica de Chile, Santiago, Chile, 9 de marzo de 2011.
- D.S. N°16. *Establece plan de prevención y descontaminación atmosférica para la región metropolitana*. Diario Oficial de la Republica de Chile, Santiago, Chile, 6 de junio de 1998.
- D.S. N°59: *Establece norma primaria de calidad primaria para material particulado respirable MP10*. Diario Oficial de la Republica de Chile, Santiago, Chile, 25 de mayo de 1998.
- D.S. N°112: *Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de azufre*. Diario Oficial de la Republica de Chile, Santiago, Chile, 6 de marzo de 2003.
- D.S. N°113: *Establece norma primaria de calidad de aire para ozono*. Diario Oficial de la Republica de Chile, Santiago, Chile, 6 de marzo de 2003.
- D.S. N°114: *Establece norma primaria de calidad de aire para dióxido de nitrógeno*. Diario Oficial de la Republica de Chile, Santiago, Chile, 6 de marzo de 2003.

- Fujiwara, M., K. Kita, T. Ogawa, S. Kawakami, T. Sano, N. Komala, S. Saraspriya, and A. Suripto, 2000: Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, **105**, 1879.
- Ganguly, N. D., and K. N. Iyer, 2014: Can El Niño induce Stratosphere – Troposphere exchange of ozone ? *Curr. Sci.*, **106**, 860–866.
- Garreaud, R., 2007: *Estructura y Estabilidad de la Atmósfera*. Santiago de Chile.
- Garreaud, R., and J. Rutlant, 2006: Factores Meteorológicos de la Contaminación Atmosférica en Santiago. Episodios Críticos de Contaminación Atmosférica de Santiago, R. Morales, Ed., Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 36–53.
- Hartmann, D. L., J. M. Wallace, V. Limpasuvan, D. W. J. Thompson, and J. R. Holton, 2000: Can ozone depletion and global warming interact to produce rapid climate change? *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, **97**, 1412–1417.
- Herrera, A., 2015: Mas de 10000 muertos por los incendios en Indonesia. *GeoMet Consult. Virtual Geogr.*, <http://consultorageomet.blogspot.cl/2015/10/mas-de-10-000-muertos-por-los-incendios.html> (Accedió January 1, 2016).
- Highwood, E. J., and B. J. Hoskins, 1998: The tropical tropopause. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 1579–1604.
- Hirsch, I., J. William, J. Jacob, W. Horowitz, and H. Goldstein, 1996: Seasonal variation of the ozone production efficiency per unit NO_x at Harvard Forest , Massachusetts. *J. Geophys. Res.*, **101**, 12,659–12,666.
- INE, 2016: *Medio Ambiente, Informe Anual*. Santiago de Chile, http://historico.ine.cl/medioambiente/descargas/2016/medio_ambiente_2016.pdf.
- Inzunza, J., 2012: Circulación de la Atmósfera. *Meteorología Descriptiva*, Concepción, p. 36.
- James, P., 2003: A 15-year climatology of stratosphere–troposphere exchange with a Lagrangian particle dispersion model 2. Mean climate and seasonal variability. *J. Geophys. Res.*, **108**, 1–16.
- Langford, A. O., and C. D. Masterst, 1998: *ß ß*. **25**, 2667–2670.
- Lavado, A. L., 2012: Las Condes como punto focal de la contaminación estival por ozono en la ciudad c iudad de Santiago. Universidad de Chile.
- Ley N°19.300. *Sobre bases generales del medio ambiente*. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile 9 de marzo de 1994.
- Liu, S., D. Kley, M. McFarland, J. Mahlman, and H. Levy, 1980: On The Origin of Tropospheric Ozone. *J. Geophys. Res.*, **85**, 7546–7552.
- Logan, J. A., 1985: Tropospheric Ozone Seasonal Behavior , Trends , and Anthropogenic Influence. **90**, 463–482.
- Maturana, J., M. Bello, and M. Manley, 2004: Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. *Com. Ocean. Nac. Chile*, 13–27.
- Meléndez, T., 1992: *Salvemos Santiago y salvemos Chile*. Santiago de Chile,.
- Mera Garrido, E. Ma., 2005: Estudio de la Evolución en la Concentración de Ozono en la Ciudad de Santiago, y su Relación con el Lugar de Presión Máxima en Chile. Universidad de Chile, .
- Ministerio de Energía, and Universidad de Chile, 2017: Explorador de Energía Solar para

- Autoconsumo. <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>.
- Ministerio del Interior, 1980: Decreto Ley N°3260: Establece Regimen de Gobierno y Administración de la Región Metropolitana de Santiago. 4. <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=7083&idVersion=1981-03-08>.
- Ministerio del Medio Ambiente, 2015: *Anteproyecto del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la región Metropolitana de Santiago*. Santiago de Chile, 78 pp. <http://santiagorespira.gob.cl/> (Accedió June 20, 2005).
- Mohanakumar, K., 2008: *Stratosphere Troposphere Interactions*. Springer, India.
- Monks, P. S., 2000: A review of the observations and origins of the spring ozone maximum. *Atmos. Environ.*, **34**, 3545–3561.
- Monks, P. S., and Coauthors, 2015: Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 8889–8973.
- Muñoz, M., 1992: La contaminación atmosférica en Santiago, impacto sobre la salud de la población. *Cent. Estud. Públicos*, **45**, 54.
- NOAA, 2016: National Oceanic And Atmospheric Administration. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/soi>.
- Quereda, J., E. Montón, J. Escrig, A. Gil, J. Olcina, and A. Rico, 2001: *Nuestro porvenir climático ¿Un escenario de aridez?* Universitat Jaume.
- Quinn, W. H., and V. T. Neal, 1987: El Niño Occurrences Over the Past Four and a Half Centuries. *J. Geophys. Res.*, **92**, 449–461.
- Rafael, Á., 2007: *Estadística Aplicada a las Ciencias de La Salud*. Primera. D. De Santos, Ed. España.
- Ramirez, C., 2012: *Precordillera de Santiago*. Santiago de Chile, 159 pp. <https://es.slideshare.net/Chris88er/precordillera-de-santiago>.
- Rasmusson, E. M., and T. H. Carpenter, 1982: Variation in Tropical Sea Surface Temperature and Surface Wind Fields Associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Weather Rev.*, **110**, 354–384.
- Romero, H., and A. Vásquez, 2005: Evaluación ambiental del proceso de urbanización de las cuencas del piedemonte andino de Santiago de Chile. *Eure*, **31**, 97–119.
- Romero, H. Irrázaval, D. Opazo, M. Salgado, and P. Smith, 2010: Climas urbanos y contaminación atmosférica en santiago de chile hugo romero. *Eure*, **36**, 35–62.
- Rubio, M. A., E. Lissi, V. Riveros, and M. Paez, 2001: Remoción de Contaminantes por Lluvia y Rocio en la Región Metropolitana. *Bol. Soc. Chil. Quím.*, **46**, 1–11.
- SINCA, 2016: Región Metropolitana de Santiago. *Minist. del Medio Ambient.*, <http://sinca.mma.gob.cl/index.php/region/index/id/M> (Accedió September 5, 2016).
- Singh, H., F. Ludwig, and W. Johnson, 1978: Tropospheric Ozone: Concentrations and Variabilities in Clean Remote Atmospheres. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 2185–2196.
- Stathopoulou, E., G. Mihalakakou, M. Santamouris, and H. S. Bagiorgas, 2008: On the impact of temperature on tropospheric ozone concentration levels in urban environments. *J. Earth Syst. Sci.*, **117**, 227–236.
- Takahashi, K., A. Montecinos, K. Goubanova, and B. Dewitte, 2011: ENSO regimes:

- Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, 1–5.
- The Royal Society, 2008: *Ground-level ozone in the 21st century : future trends , impacts and policy implications*. Londres, 148 pp.
- Tiwari, S., R. Rai, and M. Agrawal, 2008: International Journal of Remote Annual and seasonal variations in tropospheric ozone concentrations around Varanasi. *Int. J. Remote Sens.*, **29**, 4499–4514.
- Trenberth, K. E., 1997: The Definition of El Niño. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **78**, 2771–2777.
- Universidad de Chile, 2008: Antecedentes demográficos, expansión urbana y conflictos. *Rev. Urban.*, http://web.uchile.cl/vignette/prueba/revistaurbanismo.uchile.cl/CDA/urb_simple/0,1310,SCID=21160%26ISID=734%26IDG=2%26ACT=1%26PRT=21158,00.html (Accedió July 15, 2017).
- Valiente, O. M., 1996: La cara oculta de El Niño : Anomalías climáticas y ecológicas en el Pacífico Occidental. *Rev. Geogr.*, **30**, 97–110.
- Varotsos, C., K. Y. Kondratyev, and M. Efstathiou, 2001: On the seasonal variation of the surface ozone in Athens , Greece. *Atmos. Environ.*, **35**, 315–320.
- Weng, H., K. Ashok, S. K. Behera, S. a. Rao, and T. Yamagata, 2007: Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer. *Clim Dyn*, **29**, 113–129.
- Xie, F., J. Li, W. Tian, J. Zhang, and J. Shu, 2014: The Impacts of Two Types of El Niño in the Last Three Decades. *Adv. Atmos. Sci.*, **31**, 1113–1126.
- Yamagata, T., S. K. Behera, J. Luo, S. Masson, M. R. Jury, and S. a. Rao, 2004: Coupled Ocean-Atmosphere Variability in the Tropical Indian Ocean. *Earth's Clim.*, 1–23.
- Yeh, S., J. Kug, B. Dewitte, M. Kwon, B. P. Kirtman, and F. Jin, 2009: El Niño in a Changing climate. *Nature*, **461**, 511–514.
- Zambrano, E., 1996: El Niño. *Acta Oceanográfica del Pacífico*, **8**, 109–114.
- Zeng, G., and J. A. Pyle, 2005: Influence of El Niño Southern Oscillation on stratosphere/troposphere exchange and the global tropospheric ozone budget. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, 1–4.
- Ziemke, J. R., A. R. Douglass, L. D. Oman, S. E. Strahan, and B. N. Duncan, 2015: Tropospheric ozone variability in the tropics from ENSO to MJO and shorter timescales. *Atmos. Chem. Phys.*, **15**, 6373–6401.

Anexos.

1.1. Periodos con presencia de El Niño.

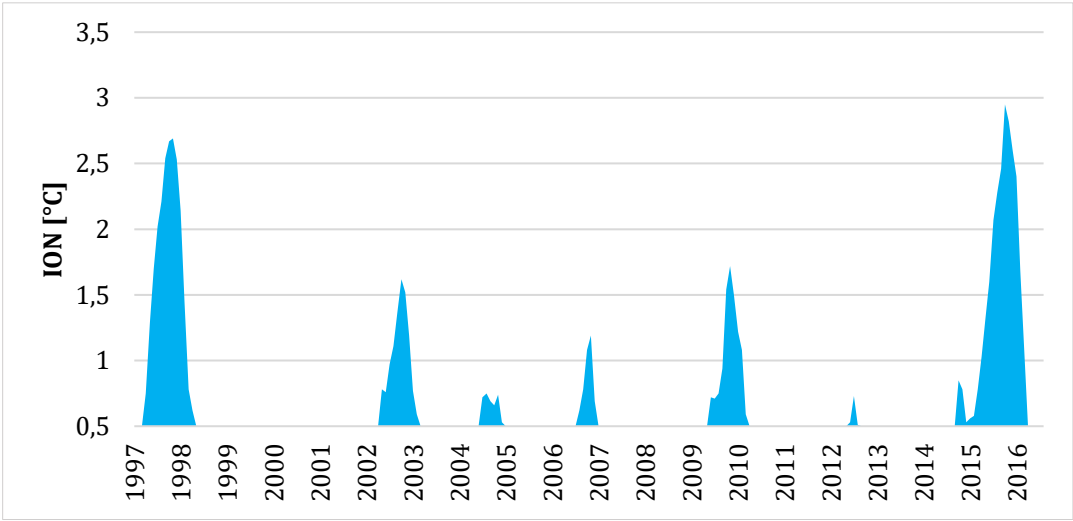


Figura 49, Valores de ION superiores a 0,5°C, sector 3-4.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de los datos del NOAA

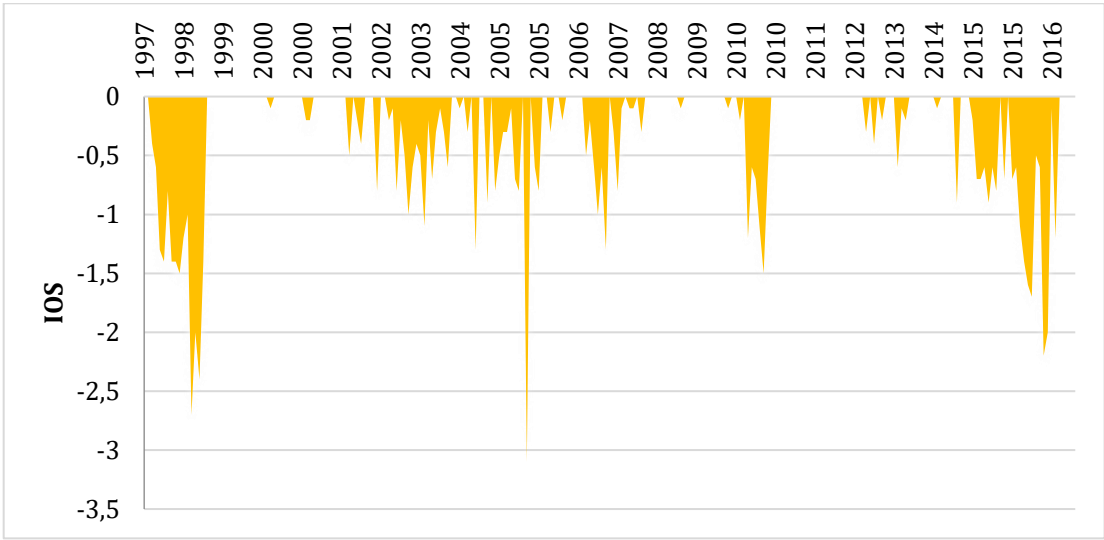


Figura 50, Fases negativas del IOS.
Fuente: Elaboración Propia, a partir de los datos del NOAA

1.2. Horas Características

1.2.1. Promedios de Temperaturas desde 1997 al 2015

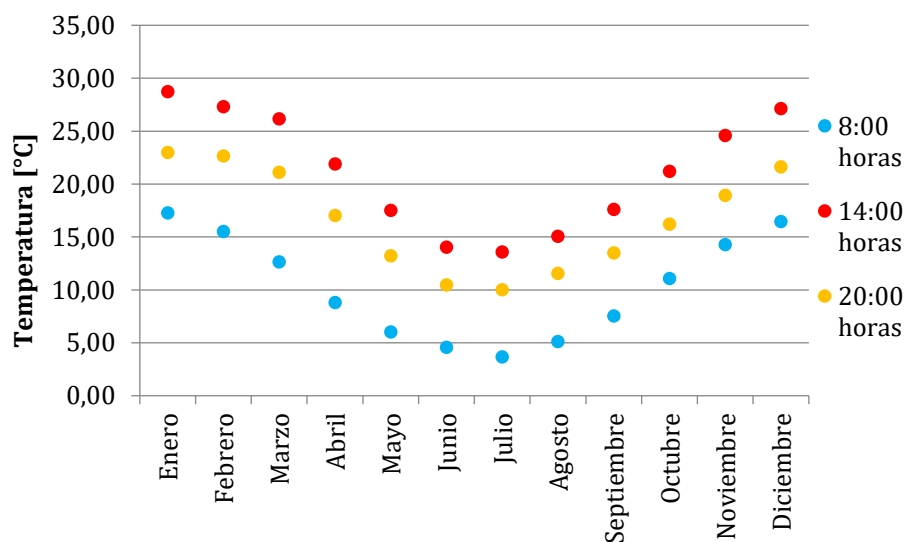


Figura 51, Temperaturas promedio de Santiago desde el año 1997 al 2015, para horas en específico.
Fuente: Elaboración propia a partir de los datos reportados (DGAC 2015)

1.2.2. Promedios Anuales de Ozono

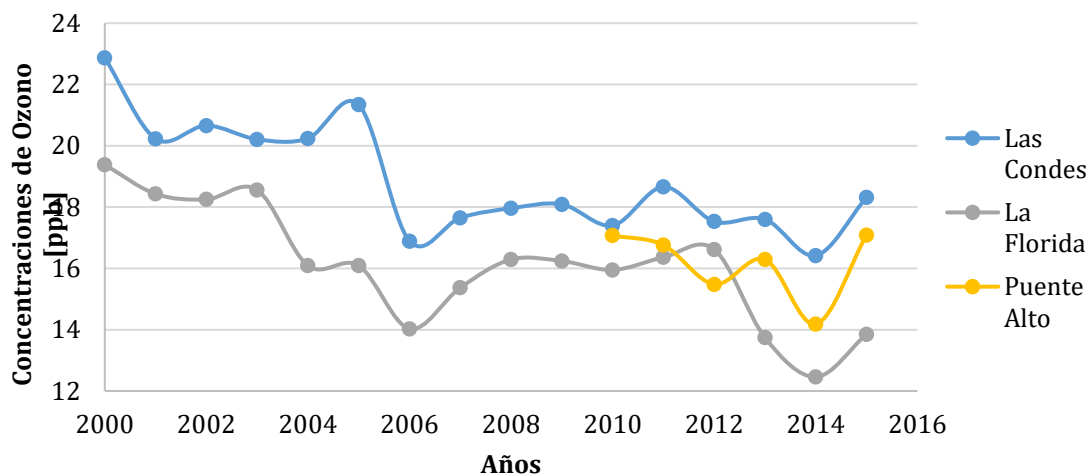
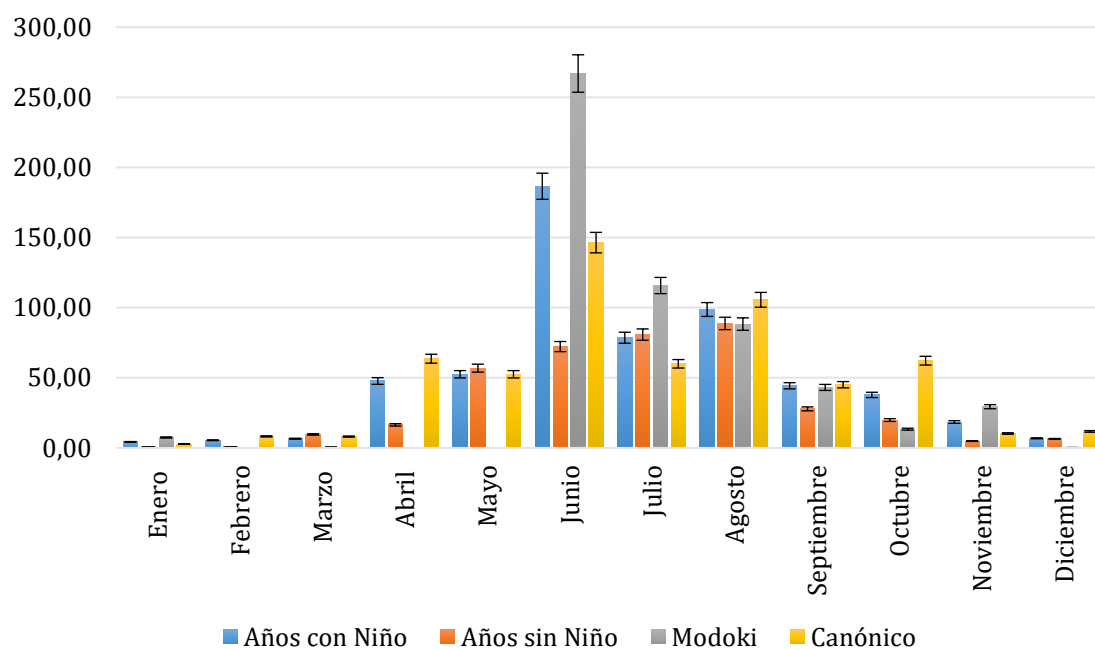


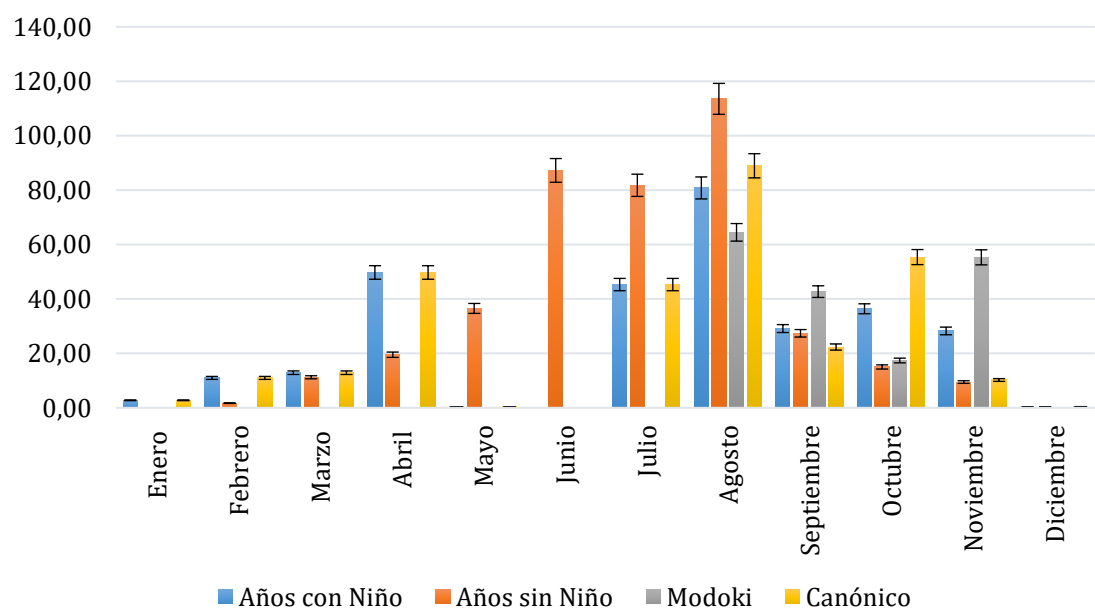
Figura 52, Promedio Anual de Ozono por Comuna.
Fuente: Elaboración Propia

1.2.3. Promedio Mensual de Precipitaciones

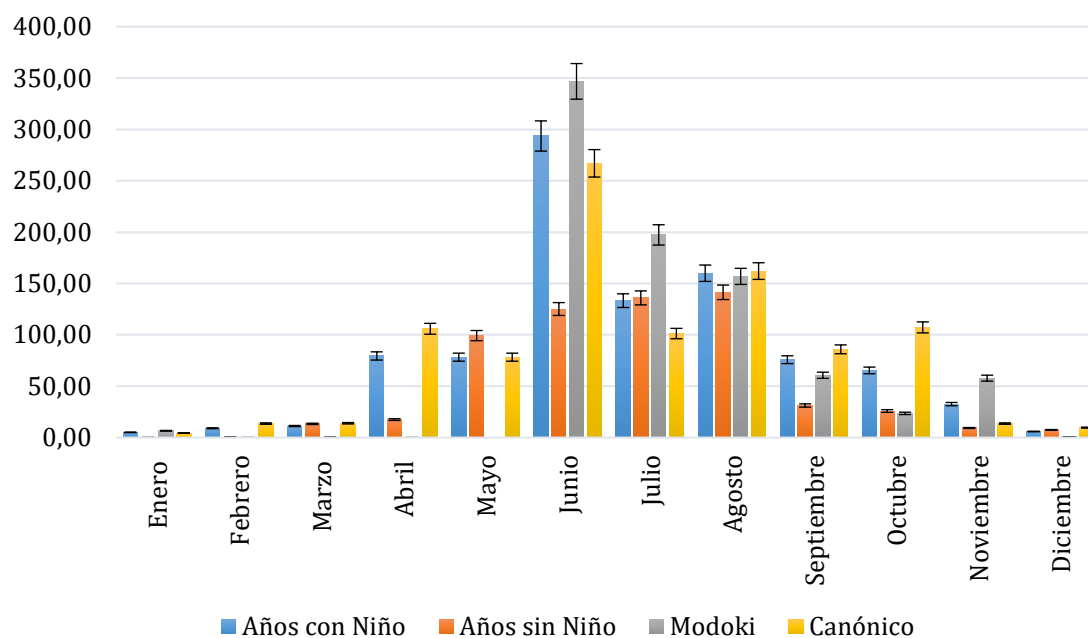
Las Condes, desde 1997 al 2016



La Florida, desde 2003 al 2016



▪ **Puente Alto, desde 1997 al 2016**



1.2.4. Concentraciones de Ozono en Horas Características Con o Sin El Niño

▪ **Las Condes, Años Sin El Niño**

Tabla 8, Promedio de concentraciones de ozono de Las Condes, en horas características sin El Niño.
Fuente: Elaboración Propia

Meses Característicos	Horas Características							
	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Enero	30	44	60	76	78	69	62	56
Febrero	26	39	53	70	80	75	65	57
Marzo	20	30	43	59	74	77	69	57
Octubre	19	27	36	46	55	56	52	44
Noviembre	27	37	49	64	69	63	56	49
Diciembre	32	44	60	75	75	66	60	53

▪ **Las Condes, Años Con El Niño**

Tabla 9, Promedio de concentraciones de ozono de Las Condes, en horas características con El Niño.
Fuente: Elaboración Propia

	Horas Características							
Meses Característicos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Enero	31	46	62	79	83	72	64	58
Febrero	25	36	49	67	79	74	63	55
Marzo	20	31	43	57	72	79	72	59
Octubre	18	25	33	42	51	52	48	41
Noviembre	25	33	44	58	63	57	52	46
Diciembre	30	42	56	73	74	65	58	51

▪ **La Florida, Años Sin El Niño.**

Tabla 10, Promedio de concentraciones de ozono de La Florida, en horas características sin El Niño.
Fuente: Elaboración Propia

	Horas Características							
Meses Característicos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Enero	27	41	55	57	53	50	48	45
Febrero	21	35	50	59	56	52	49	45
Marzo	15	28	44	57	59	55	51	46
Octubre	15	24	34	42	44	43	41	38
Noviembre	25	37	49	52	51	49	47	42
Diciembre	29	44	56	55	52	49	47	43

▪ **La Florida, Años Con El Niño.**

Tabla 11, Promedio de concentraciones de ozono de La Florida, en horas características con El Niño.
Fuente: Elaboración Propia

	Horas Características							
Meses Característicos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Enero	27	41	55	57	52	49	46	44
Febrero	19	32	47	57	54	50	46	43
Marzo	13	25	40	52	56	52	48	43
Octubre	15	23	33	41	44	43	41	37
Noviembre	22	32	43	46	45	44	41	38
Diciembre	26	39	52	52	49	46	44	40

▪ **Puente Alto, Años Sin El Niño.**

Tabla 12, Promedio de concentraciones de ozono de Puente Alto, en horas características sin El Niño
Fuente: Elaboración Propia

	Horas Características							
Meses Característicos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Enero	26	37	46	48	49	48	46	43
Febrero	23	32	41	45	45	45	43	41
Marzo	18	28	38	46	49	49	48	44
Octubre	18	25	32	36	38	39	38	36
Noviembre	25	34	41	44	45	44	43	40
Diciembre	26	36	42	44	44	43	42	40

▪ **Puente Alto, Años Con El Niño.**

Tabla 13, Promedio de concentraciones de ozono de Puente Alto, en horas características sin El Niño.
Fuente: Elaboración Propia

	Horas Características							
Meses Característicos	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
Enero	28	40	48	50	51	49	48	46
Febrero	23	33	44	50	52	50	48	45
Marzo	20	29	39	47	51	52	51	48
Octubre	19	25	32	38	40	41	40	38
Noviembre	22	30	36	40	42	42	41	38
Diciembre	28	38	44	47	48	48	46	43

1.2.5. Promedio de Concentraciones de NO_x Con o Sin El Niño

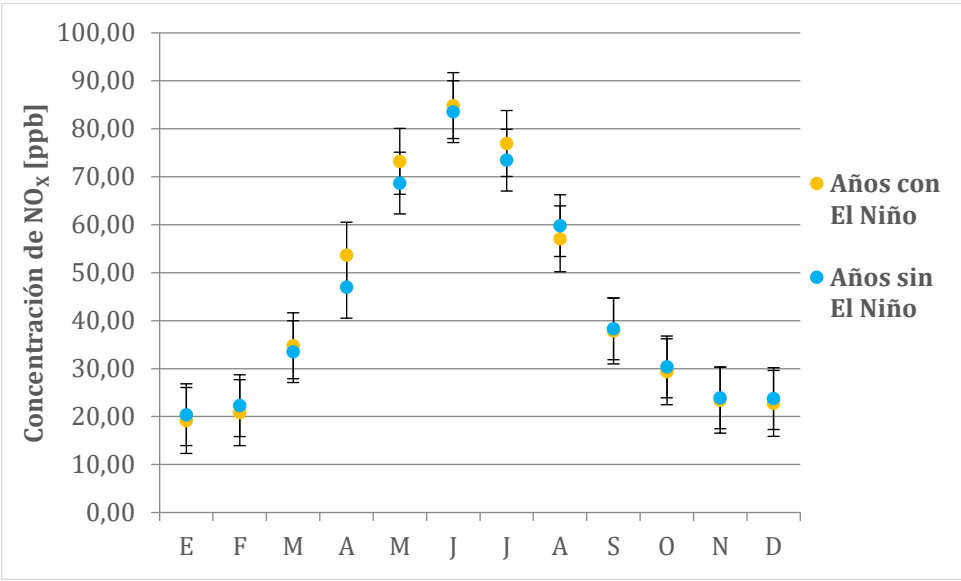


Figura 53, Promedios Mensuales de NO_x, Las Condes.
Fuente: Elaboración Propia

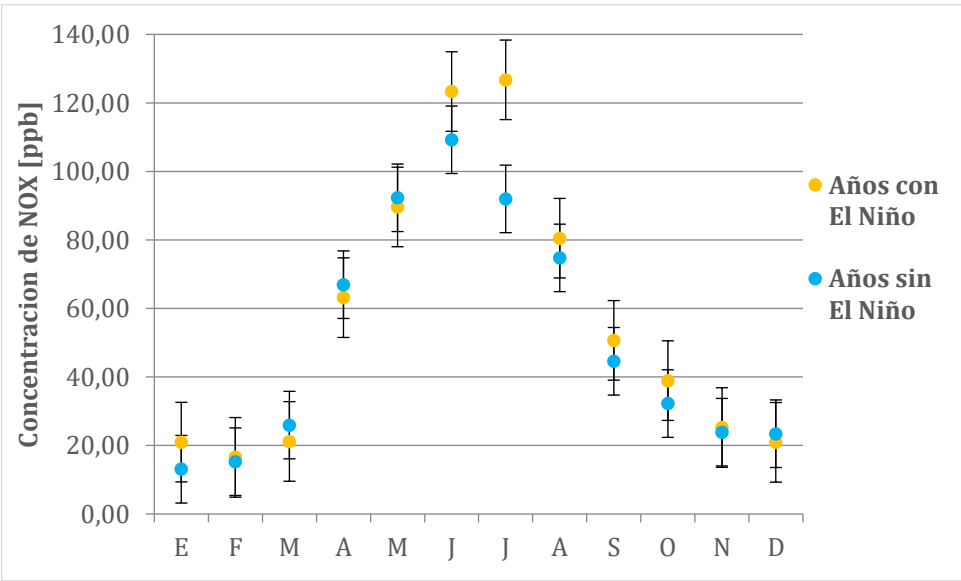


Figura 54, Promedios Mensuales de NO_x, La Florida.
Fuente: Elaboración Propia

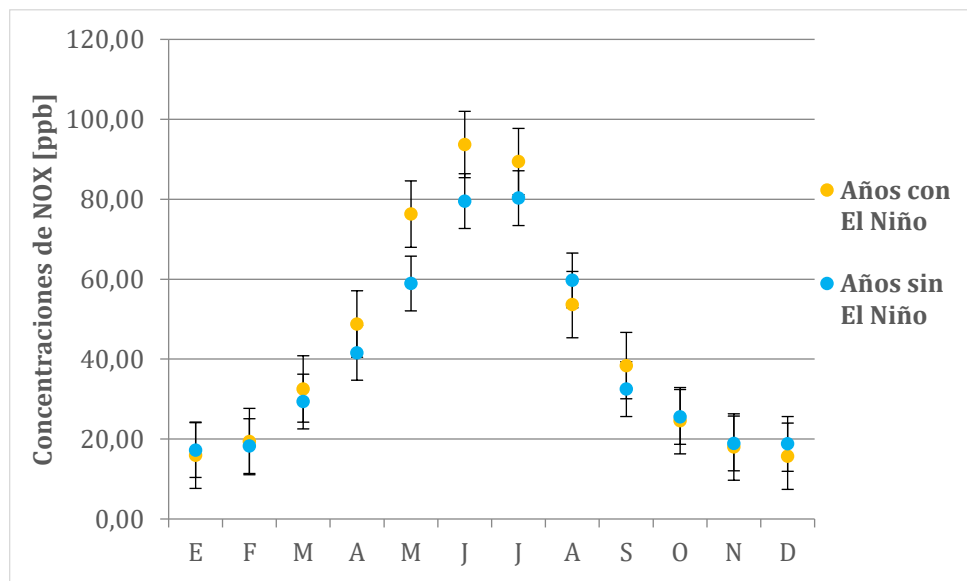


Figura 55, Promedios Mensuales de NOx, Puente Alto.
Fuente: Elaboración Propia

1.2.6. Coeficientes de Correlación (R)

▪ Temperatura y Concentraciones de Ozono.

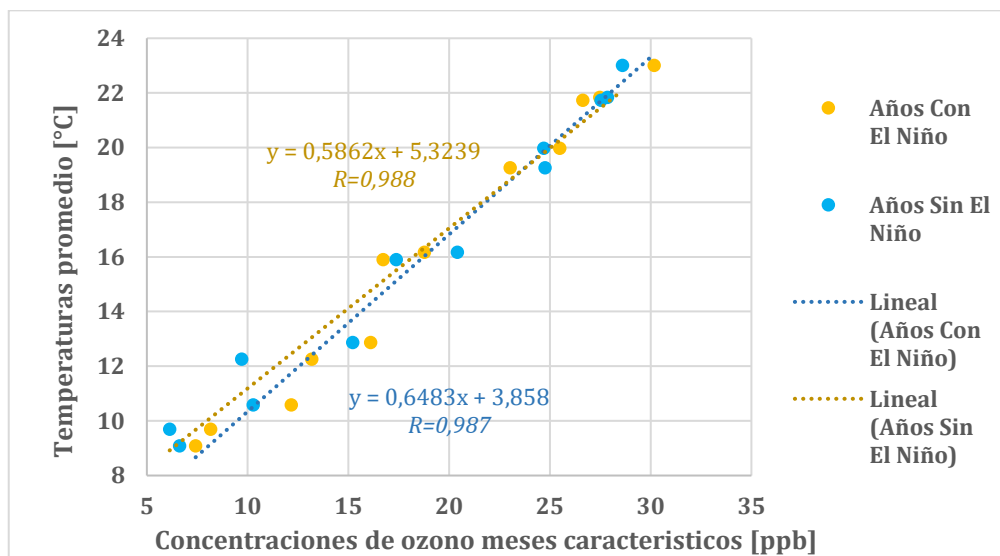


Figura 56, Correlación Lineal de la temperatura y las concentraciones de Ozono en Las Condes
Fuente: Elaboración propia.

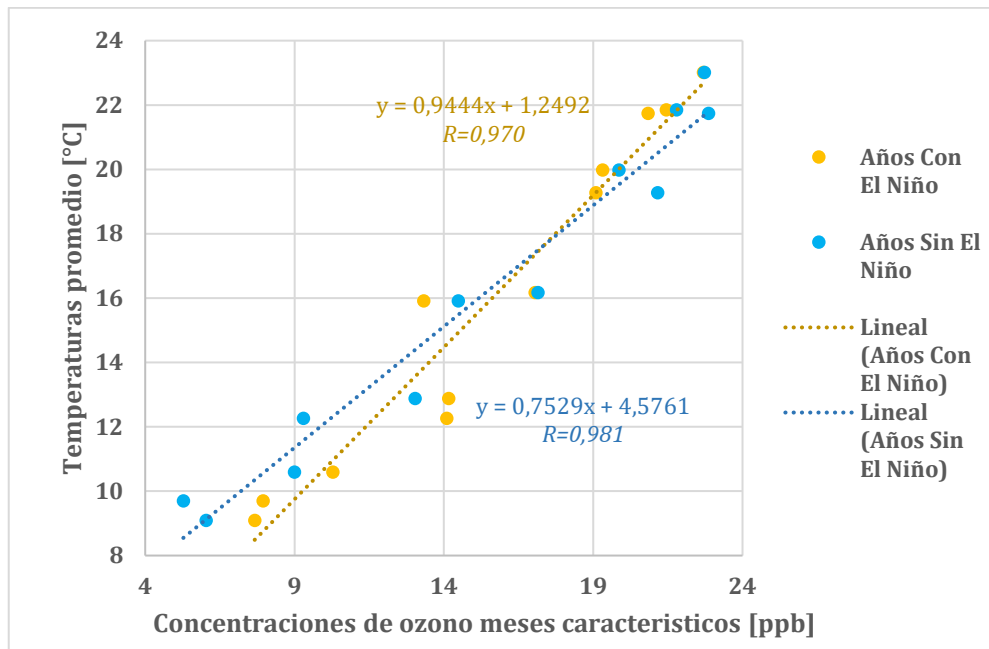


Figura 57, Correlación Lineal de la temperatura y las concentraciones de Ozono en La Florida
Fuente: Elaboración propia.

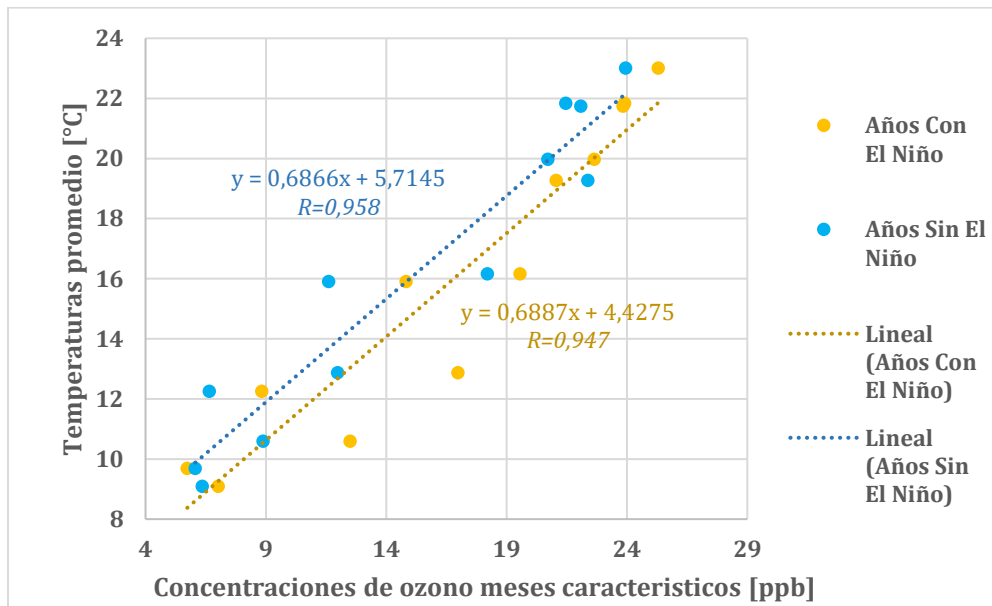


Figura 58, Correlación Lineal de la temperatura y las concentraciones de Ozono en Puente Alto
Fuente: Elaboración propia.

▪ **Concentraciones de NO_x y Concentraciones de Ozono.**

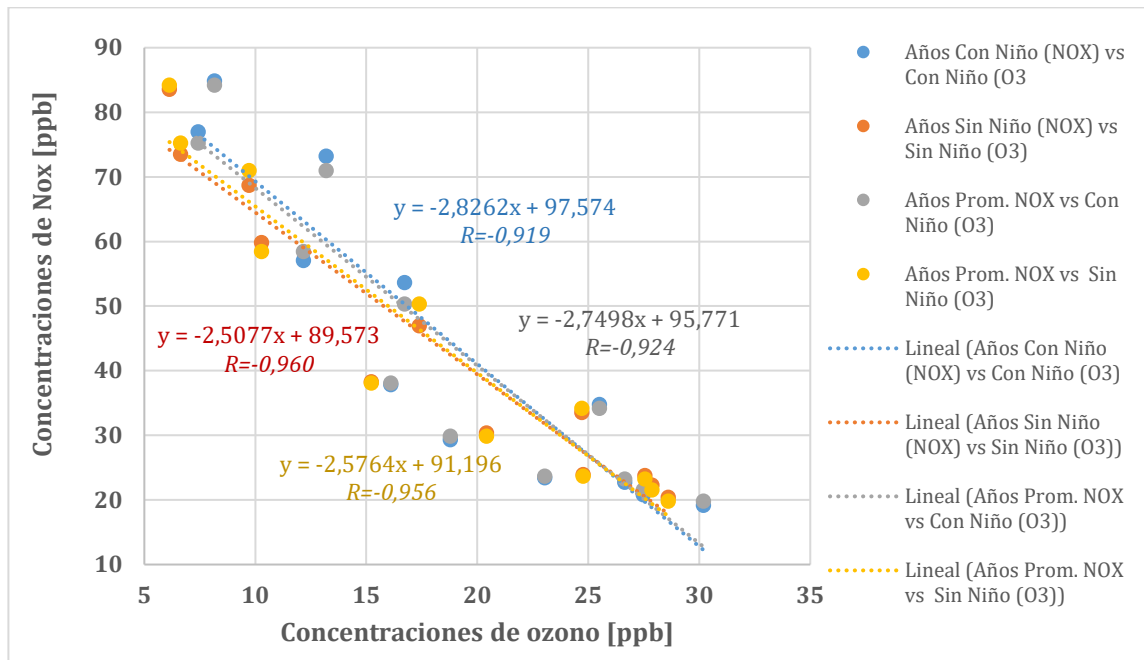


Figura 59, Correlación Lineal entre las concentraciones de NO_x y las concentraciones de Ozono en Las Condes
Fuente: Elaboración propia.

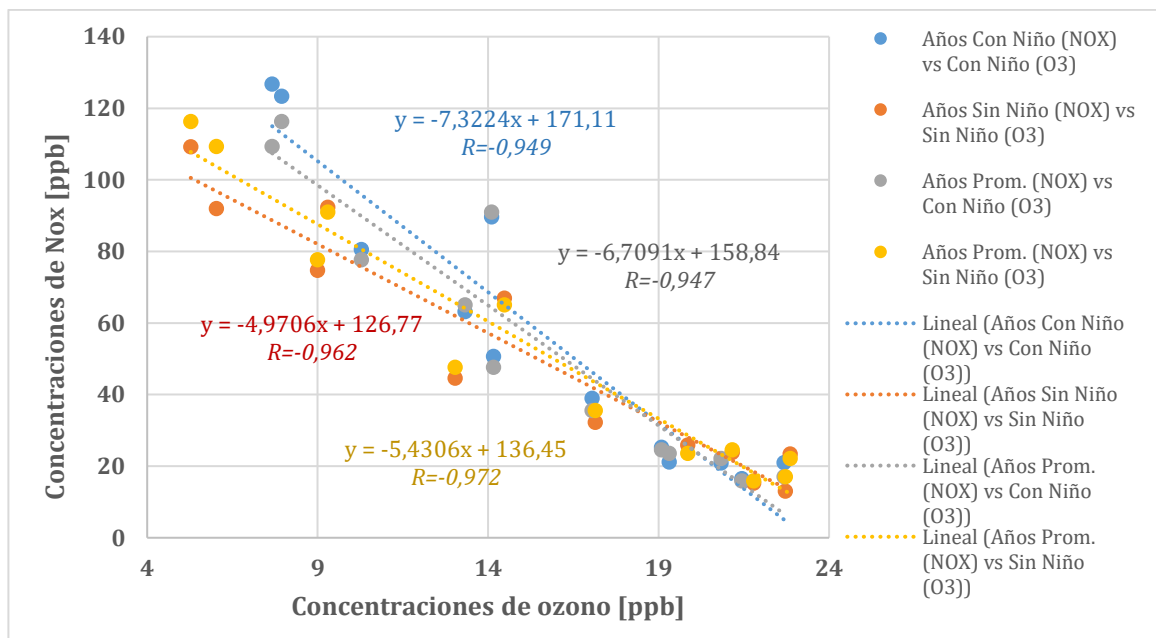


Figura 60, Correlación Lineal entre las concentraciones de NO_x y las concentraciones de Ozono en La Florida.
Fuente: Elaboración propia.

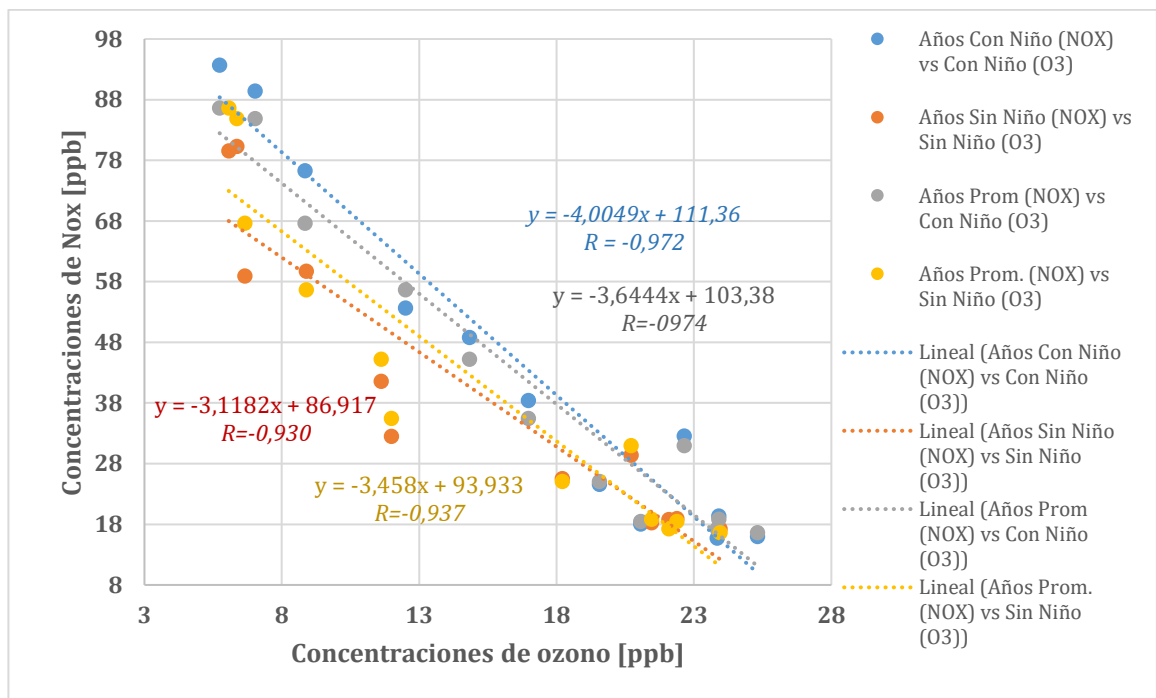


Figura 61, Correlación Lineal entre las concentraciones de NO_x y las concentraciones de Ozono en Puente Alto.
Fuente: Elaboración propia.