Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
Centro de Investigación en Matemáticas, A.C.

Estimaciones de la Tasa de Reproducción Efectiva R_t de COVID-19 para los Estados y Zonas Metropolitanas de México

13 de Octubre de 2021

Reporte realizado por:

- Dra. Graciela González Farías
- M.en C. Domingo Iván Rodríguez González

CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATEMÁTICAS, A.C.

13 de Octubre de 2021

Tabla de Contenidos

1 Estimaciones de R_t en Orden Ascendente 4

1.1 Estimaciones de R_t por Estado en Orden Ascendente 5

1.2 Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana en Orden Ascendente 6

2 Estimaciones de R_t por Estado 7

2.1 Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Estado 19

3 Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana 20

3.1 Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Zona Metropolitana 30

4 Metodología de Estimación de R_t 31

4.1 Metodología para la Estimación del R_t. 32

4.1.1 Datos de entrada para la estimación 32

4.1.2 Estimación de la tasa de reproducción efectiva R_t 32

1. Estimaciones de R_t en Orden Ascendente

1.1 Estimaciones de R_t por Estado en Orden Ascendente

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 13 de Octubre de 2021

La figura 1.1 muestra las estimaciones del R_t para los 32 estados de México, ordenados de manera ascendente. Se tomaron los datos de nuevos casos hasta el día 01 de Octubre de 2021. En verde se muestran los estados para los que el R_t estimado es menor a 1. Se incluyen los intervalos de máxima densidad del 50 % y 90 %.

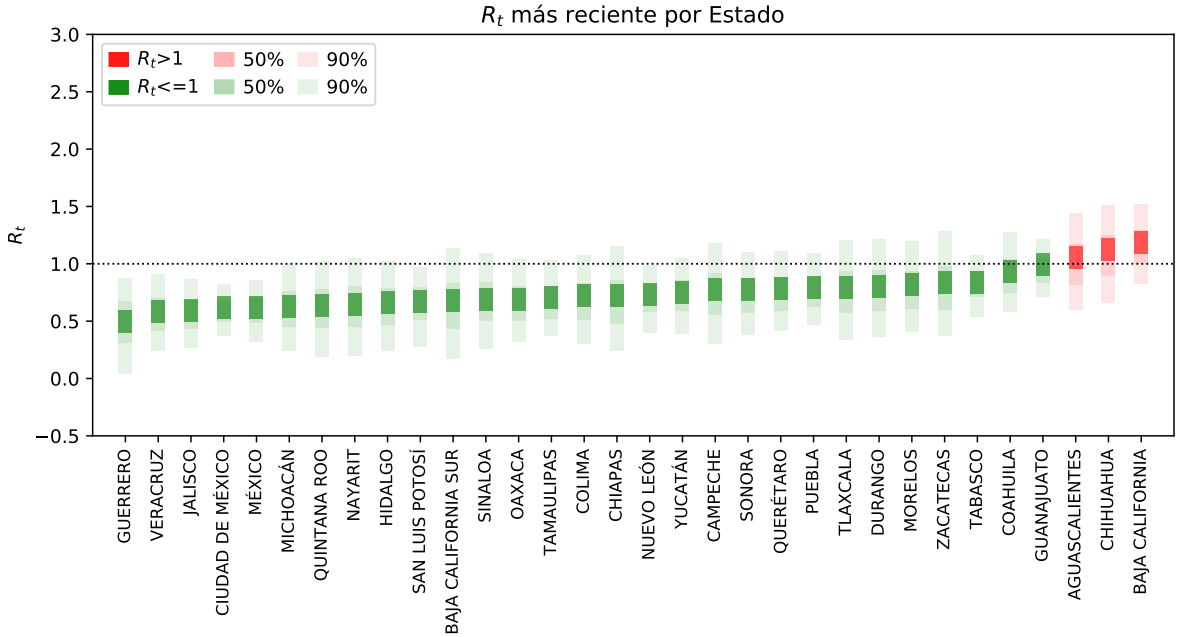


Fig. 1.1: Valor de R_t más reciente para los 32 estados de México.

1.2 Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana en Orden Ascendente

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 13 de Octubre de 2021

La figura 1.2 muestra las estimaciones del R_t para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos confirmados de COVID-19, ordenadas de manera ascendente. Se tomaron los datos de nuevos casos hasta el día 01 de Octubre de 2021. En verde se muestran las zonas metropolitanas para las que el R_t estimado es menor a 1. Se incluyen los intervalos de máxima densidad del 50 % y 90 %.

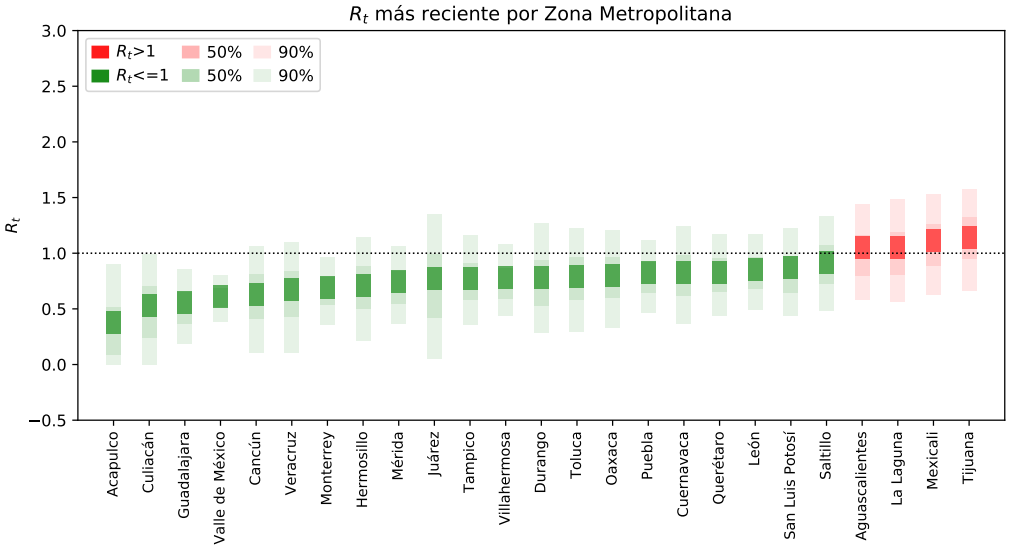


Fig. 1.2: Valor de R_t más reciente para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos.

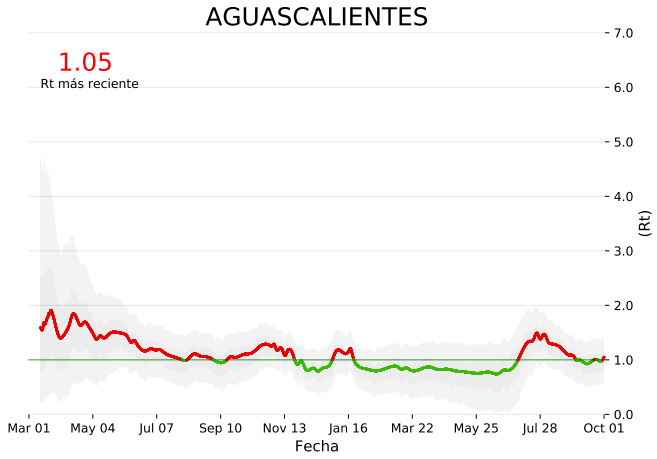
CONACYT

CIMAT

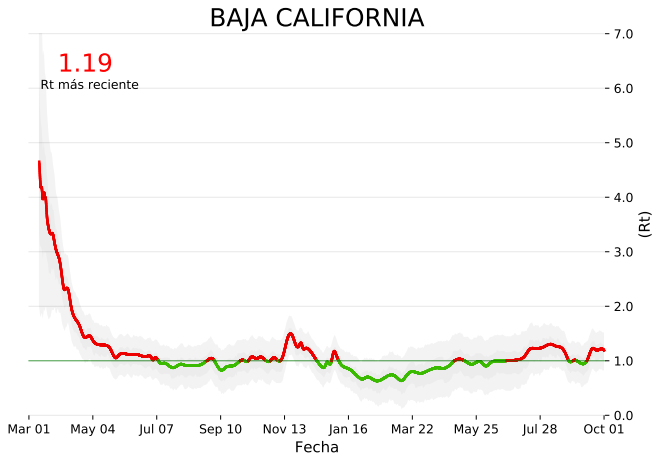
2. Estimaciones de R_t por Estado

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 13 de Octubre de 2021

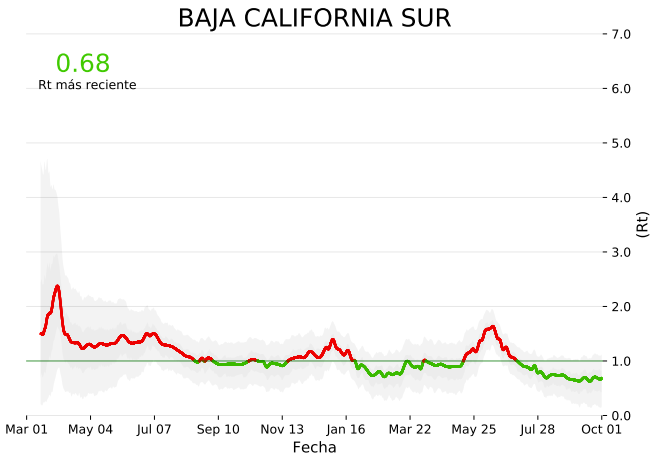
A contiuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa R_t a lo largo del tiempo para los 32 estados de México. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 01 de Octubre de 2021.



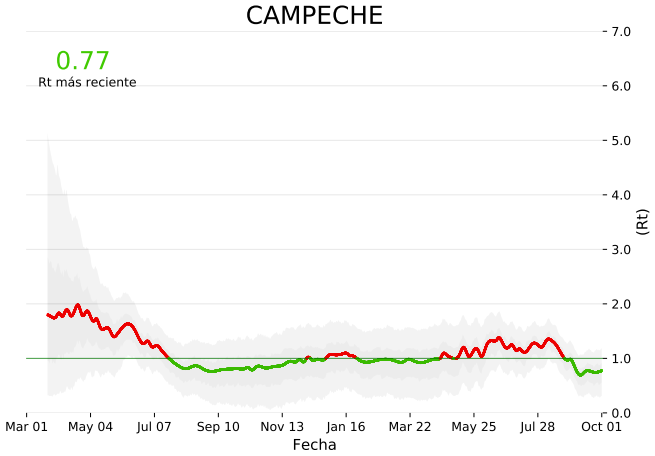
34795	casos totales
2799	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
2425.36	casos por 100mil habitantes
0.93 %	de casos a nivel nacional



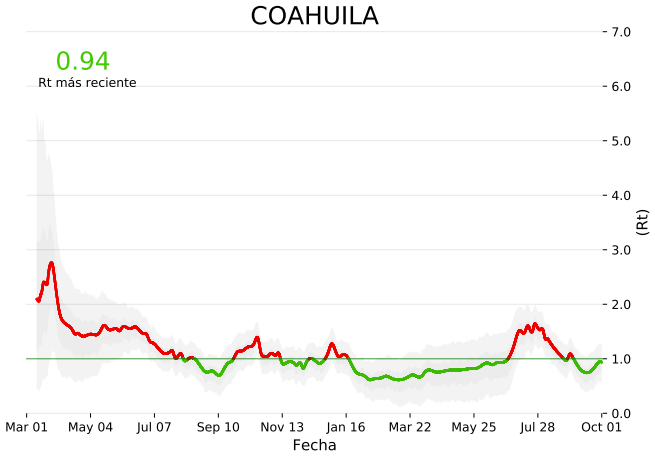
63754	casos totales
9529	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
1753.96	casos por 100mil habitantes
1.71 %	de casos a nivel nacional



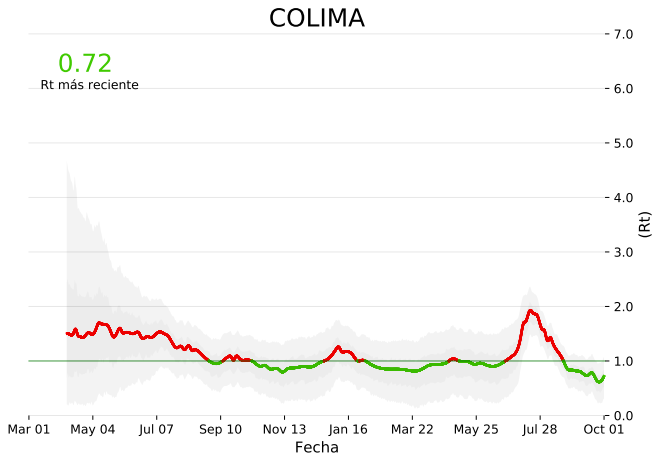
55639	casos totales
2339	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
6914.19	casos por 100mil habitantes
1.49 %	de casos a nivel nacional



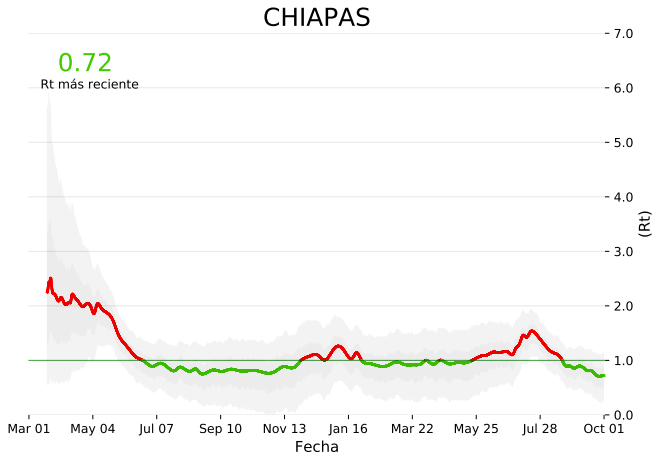
23431	casos totales
2009	defunciones totales
2020-03-08	fecha de inicio
2341.66	casos por 100mil habitantes
0.63 %	de casos a nivel nacional



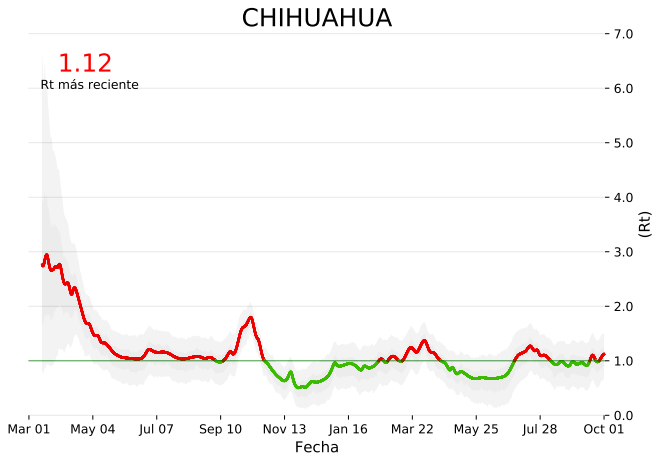
90992	casos totales
7265	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
2826.96	casos por 100mil habitantes
2.43 %	de casos a nivel nacional



32656	casos totales
1950	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
4159.19	casos por 100mil habitantes
0.87 %	de casos a nivel nacional

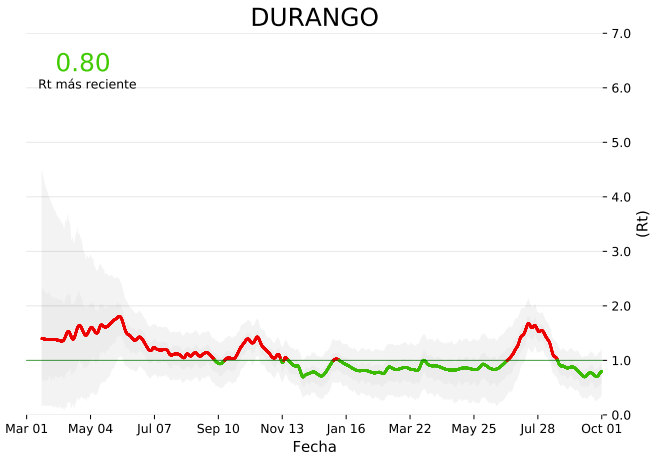


22728	casos totales
2246	defunciones totales
2020-02-29	fecha de inicio
396.62	casos por 100mil habitantes
0.61 %	de casos a nivel nacional



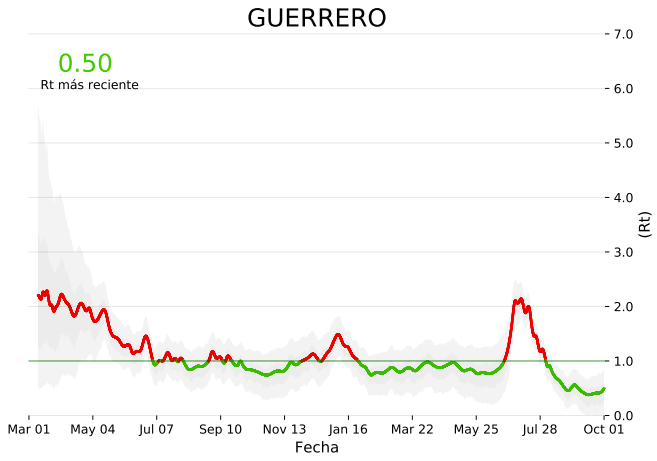
66596	casos totales
7997	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
1751.84	casos por 100mil habitantes
1.78 %	de casos a nivel nacional

959572	casos totales
39542	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
10639.87	casos por 100mil habitantes
25.67 %	de casos a nivel nacional

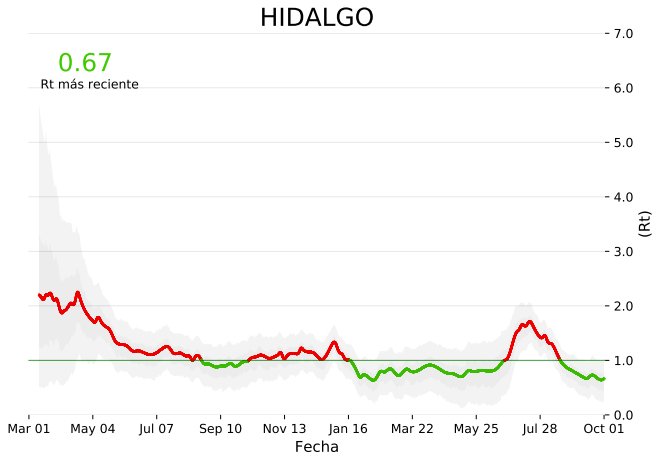


48017	casos totales
2989	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
2569.13	casos por 100mil habitantes
1.28 %	de casos a nivel nacional

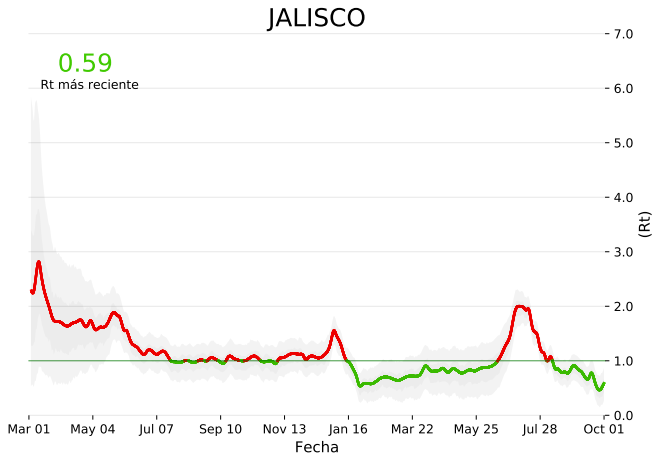
181214	casos totales
12290	defunciones totales
2020-03-01	fecha de inicio
2909.58	casos por 100mil habitantes
4.85 %	de casos a nivel nacional



75553	casos totales
6009	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
2065.96	casos por 100mil habitantes
2.02 %	de casos a nivel nacional

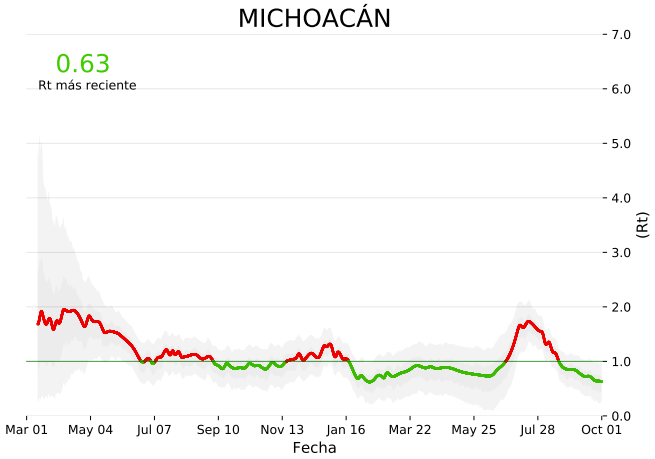


61201	casos totales
7644	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
1982.92	casos por 100mil habitantes
1.64 %	de casos a nivel nacional



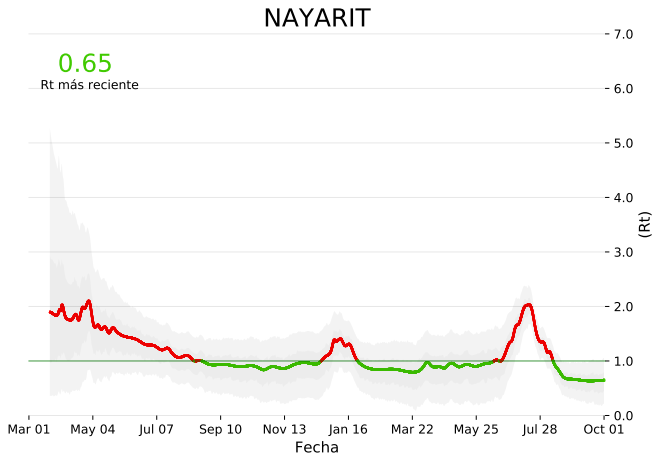
157965	casos totales
16575	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
1878.37	casos por 100mil habitantes
4.23 %	de casos a nivel nacional

368845	casos totales
43439	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
2116.42	casos por 100mil habitantes
9.87 %	de casos a nivel nacional



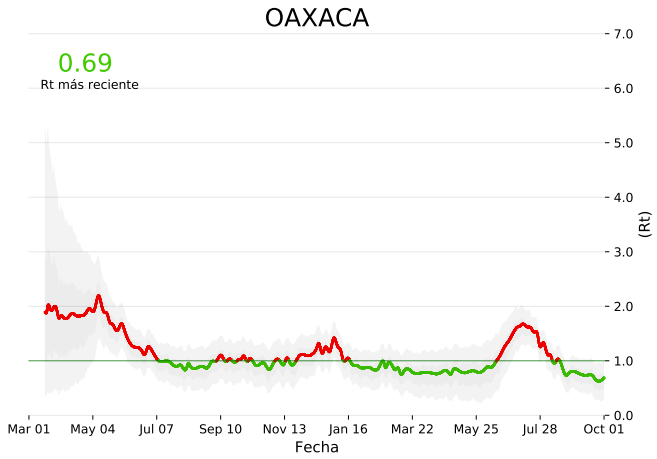
72091	casos totales
7835	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
1493.99	casos por 100mil habitantes
1.93 %	de casos a nivel nacional

49250	casos totales
4648	defunciones totales
2020-03-09	fecha de inicio
2409.42	casos por 100mil habitantes
1.32 %	de casos a nivel nacional

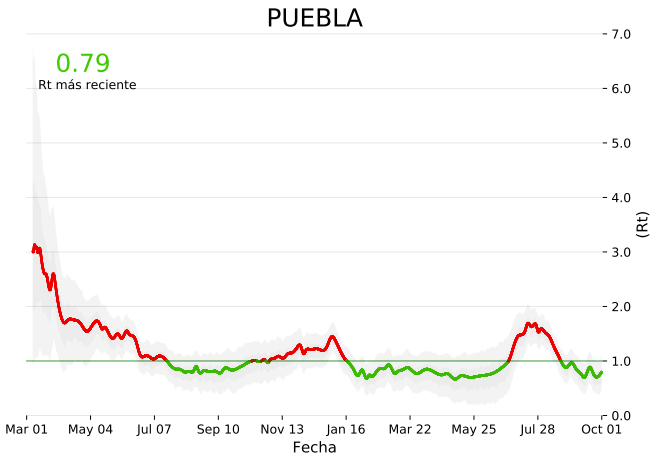


33449	casos totales
2722	defunciones totales
2020-03-03	fecha de inicio
2595.82	casos por 100mil habitantes
0.89 %	de casos a nivel nacional

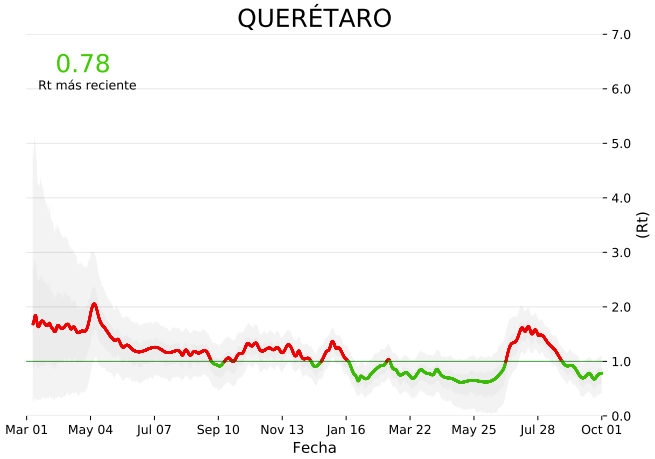
200675	casos totales
12735	defunciones totales
2020-03-04	fecha de inicio
3577.00	casos por 100mil habitantes
5.37 %	de casos a nivel nacional



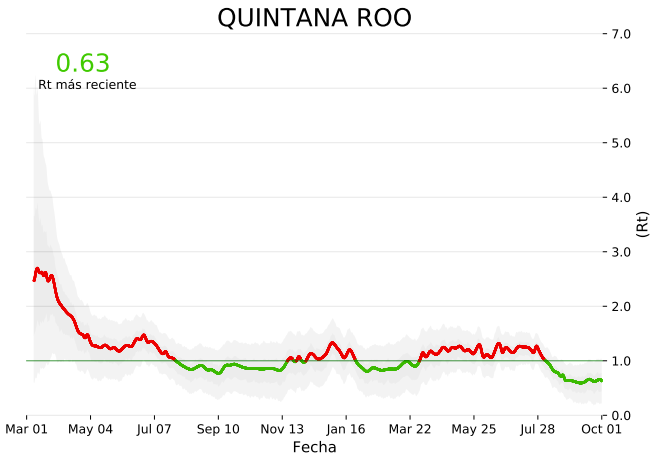
79603	casos totales
5344	defunciones totales
2020-03-01	fecha de inicio
1921.11	casos por 100mil habitantes
2.13 %	de casos a nivel nacional



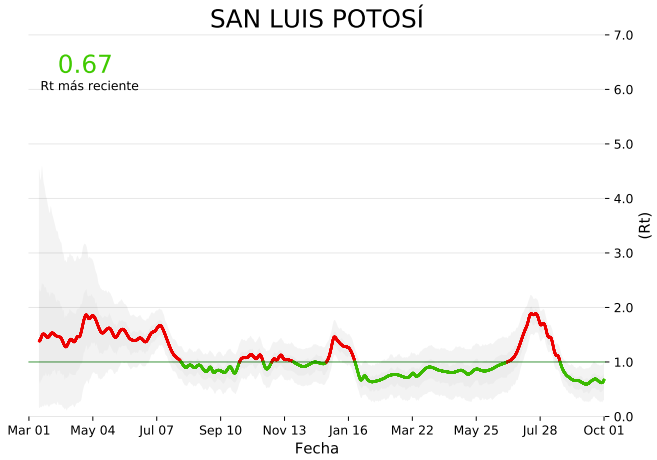
122105	casos totales
14904	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
1848.83	casos por 100mil habitantes
3.27 %	de casos a nivel nacional



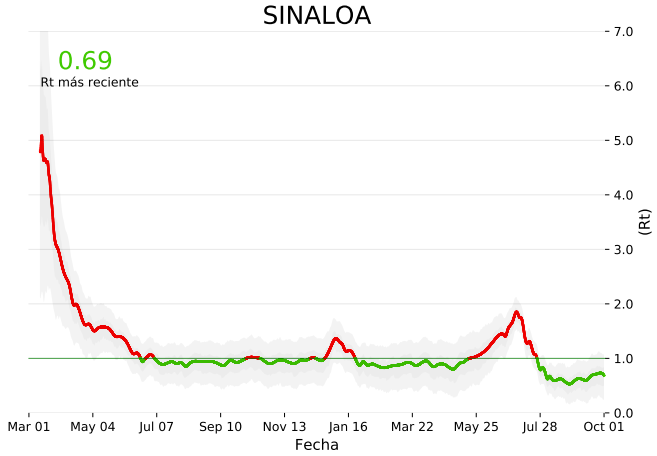
95297	casos totales
5407	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
4180.36	casos por 100mil habitantes
2.55 %	de casos a nivel nacional



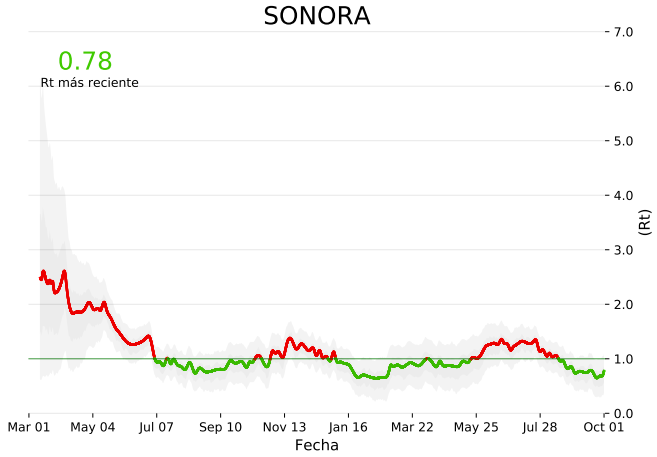
58740	casos totales
4001	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
3408.66	casos por 100mil habitantes
1.57 %	de casos a nivel nacional



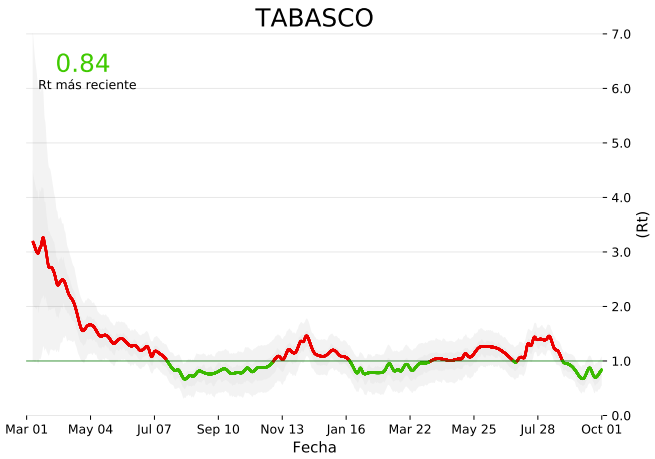
101253	casos totales
6489	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
3532.73	casos por 100mil habitantes
2.71 %	de casos a nivel nacional



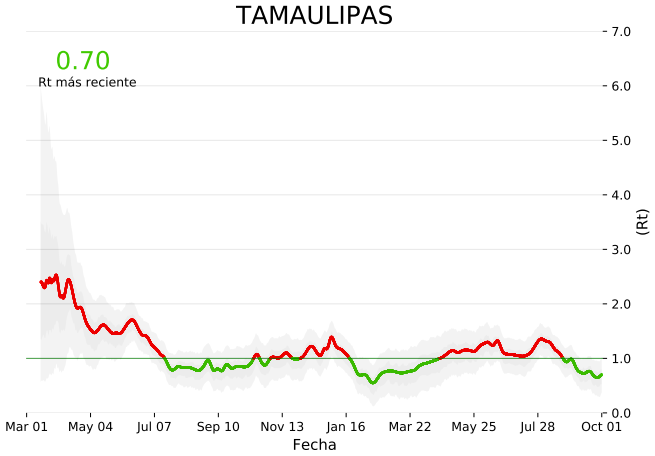
72604	casos totales
8583	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
2300.02	casos por 100mil habitantes
1.94 %	de casos a nivel nacional



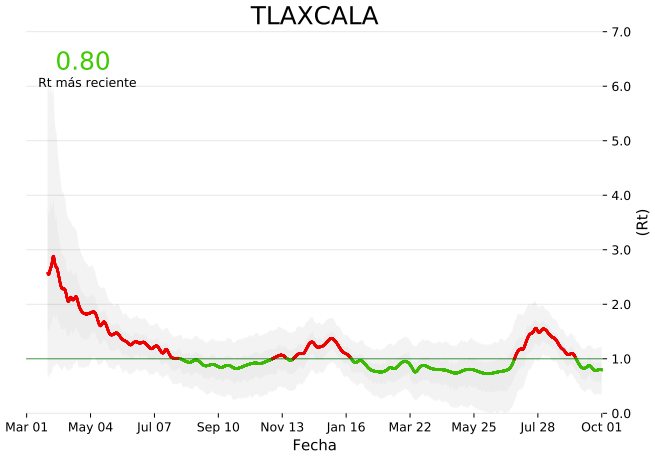
109781	casos totales
8316	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
3570.41	casos por 100mil habitantes
2.94 %	de casos a nivel nacional



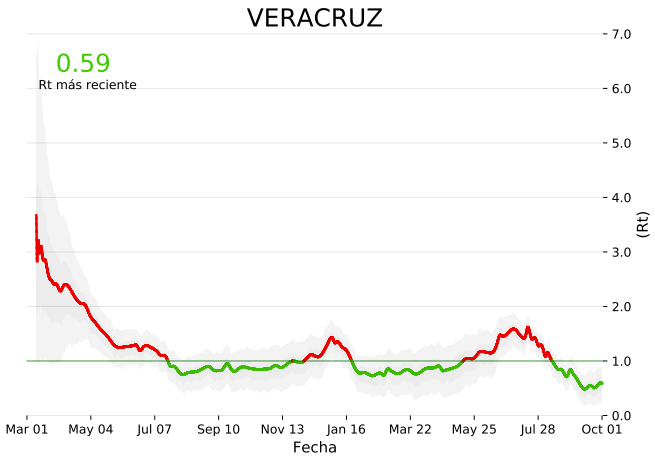
139066	casos totales
5328	defunciones totales
2020-03-04	fecha de inicio
5406.32	casos por 100mil habitantes
3.72 %	de casos a nivel nacional



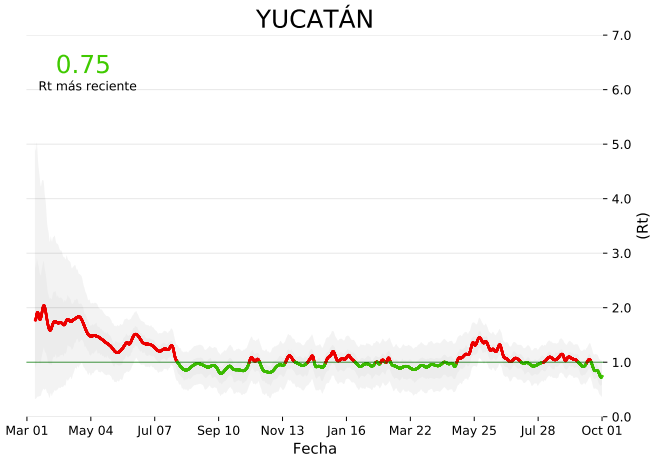
99597	casos totales
6600	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
2728.23	casos por 100mil habitantes
2.66 %	de casos a nivel nacional



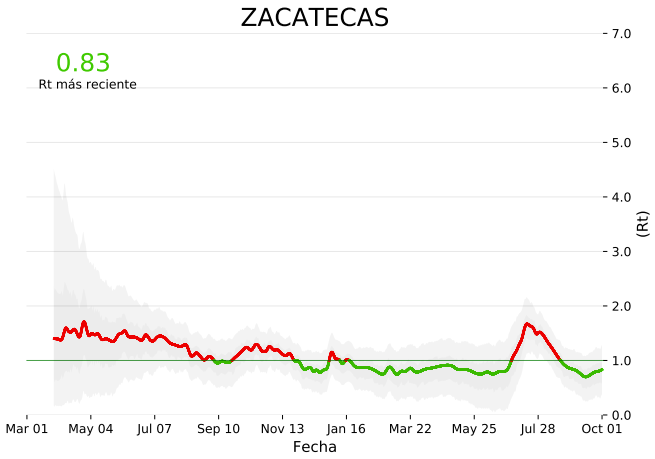
28901	casos totales
2909	defunciones totales
2020-03-06	fecha de inicio
2094.26	casos por 100mil habitantes
0.77 %	de casos a nivel nacional



120440	casos totales
14095	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
1410.33	casos por 100mil habitantes
3.22 %	de casos a nivel nacional



71852	casos totales
5357	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
3180.56	casos por 100mil habitantes
1.92 %	de casos a nivel nacional



41087	casos totales
3298	defunciones totales
2020-03-03	fecha de inicio
2465.58	casos por 100mil habitantes
1.10 %	de casos a nivel nacional

2.1 Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Estado

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 13 de Octubre de 2021

La figura 2.1 muestra la tasa de crecimiento ($R_t * I$) a lo largo del tiempo, es decir, los casos nuevos esperados por día para la tasa R_t estimada y el número de casos nuevos registrados ese día (I). Se muestra la comparación con la curva nacional (obtenida a partir de los datos por Estado) para observar la contribución de cada uno de los Estados a la tasa de crecimiento nacional.

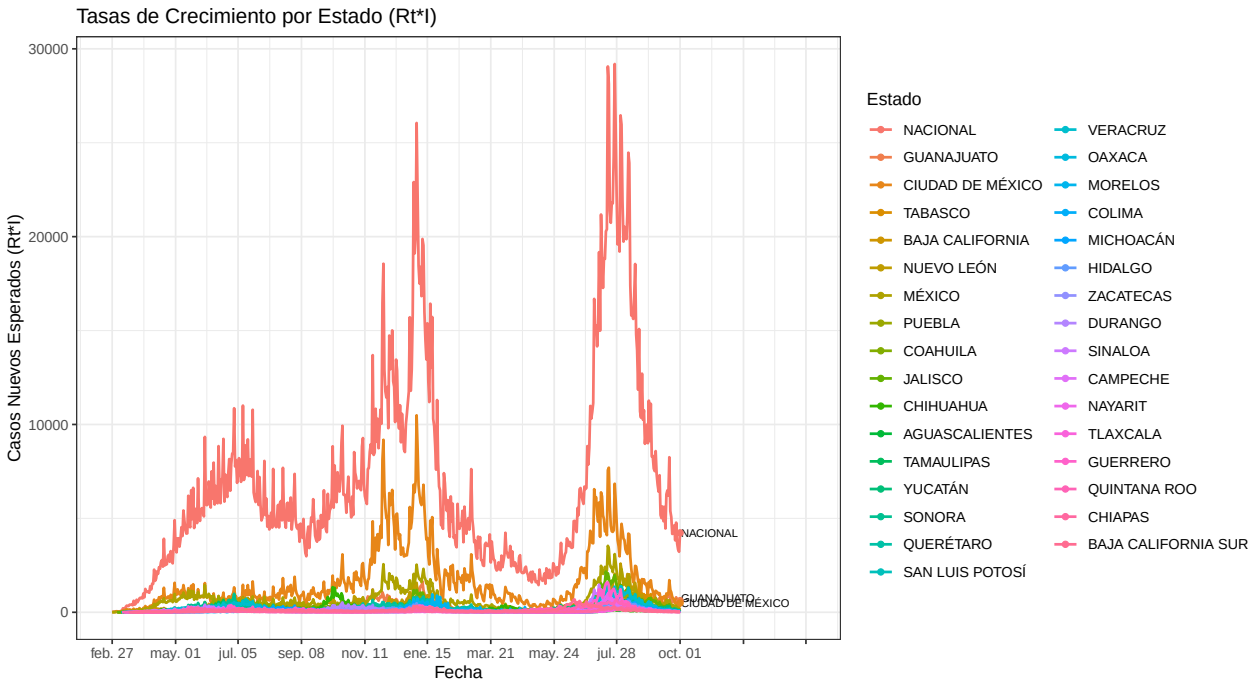


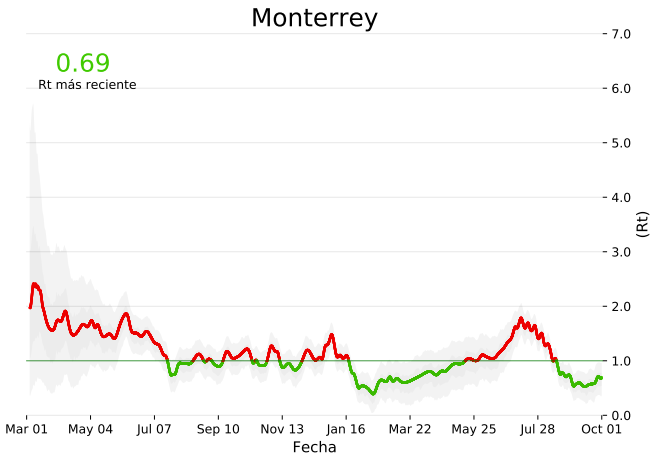
Fig. 2.1: Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Estado.

3. Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana

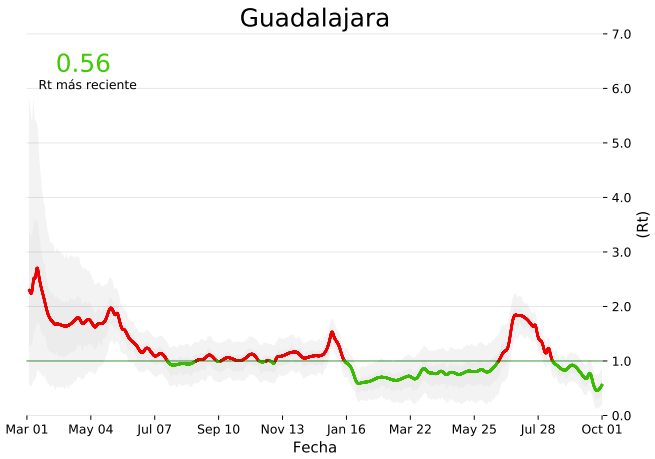
Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 13 de Octubre de 2021

A contiuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa R_t a lo largo del tiempo para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos de COVID-19. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 01 de Octubre de 2021.

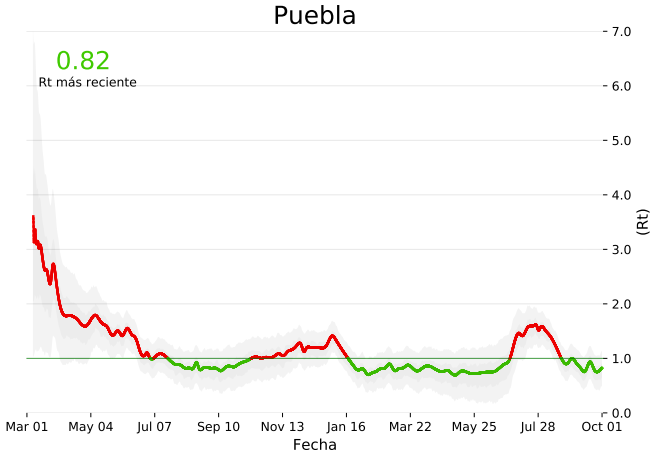
1269863	casos totales
75394	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
5787.19	casos por 100mil habitantes
33.96 %	de casos a nivel nacional



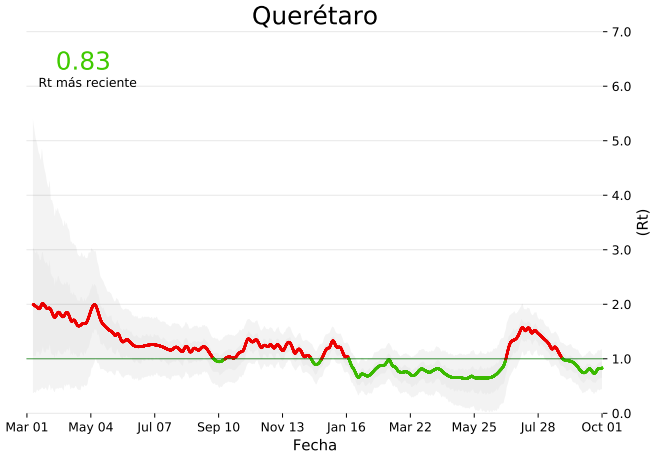
183259	casos totales
12021	defunciones totales
2020-03-04	fecha de inicio
3569.57	casos por 100mil habitantes
4.90 %	de casos a nivel nacional



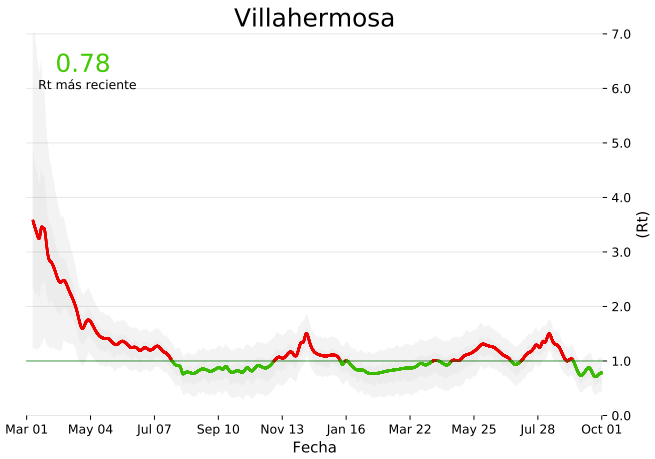
108337	casos totales
11359	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
2066.25	casos por 100mil habitantes
2.90 %	de casos a nivel nacional



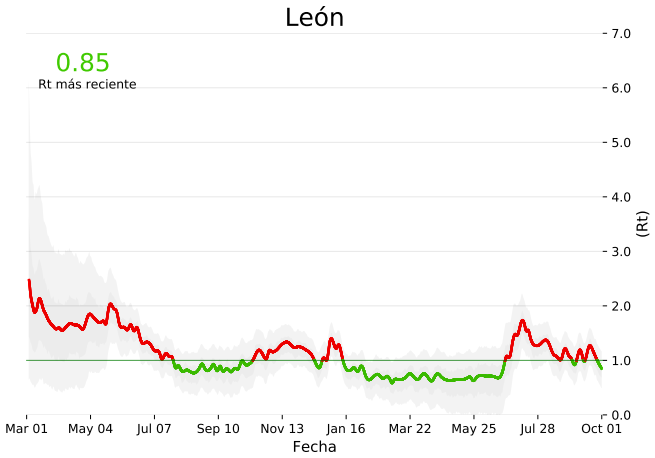
99227	casos totales
10405	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
3577.75	casos por 100mil habitantes
2.65 %	de casos a nivel nacional



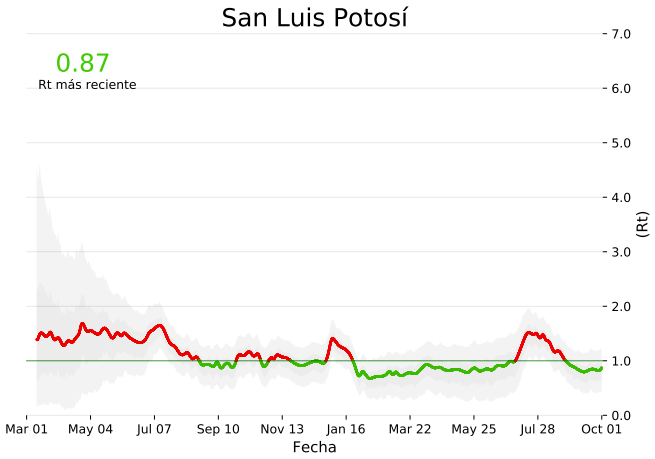
78075	casos totales
4209	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
5281.76	casos por 100mil habitantes
2.09 %	de casos a nivel nacional



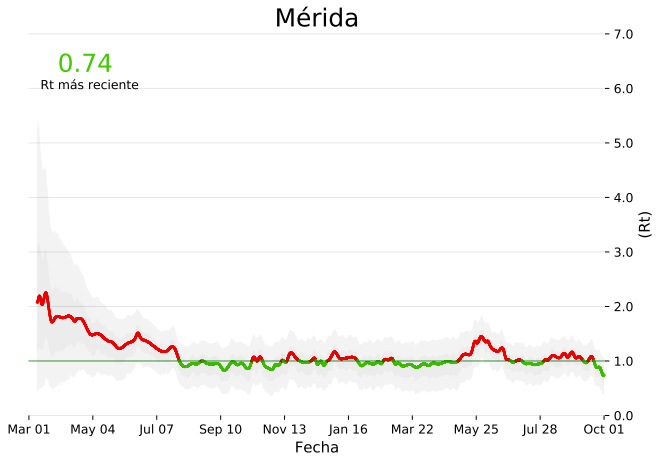
73686	casos totales
2579	defunciones totales
2020-03-04	fecha de inicio
8289.88	casos por 100mil habitantes
1.97 %	de casos a nivel nacional



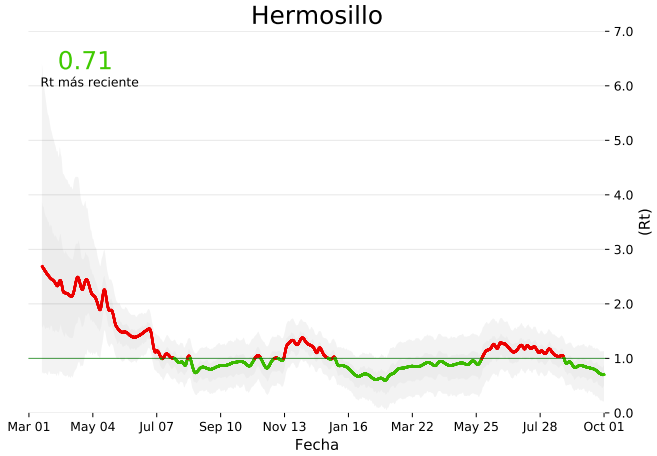
62981	casos totales
4811	defunciones totales
2020-03-01	fecha de inicio
3348.93	casos por 100mil habitantes
1.68 %	de casos a nivel nacional



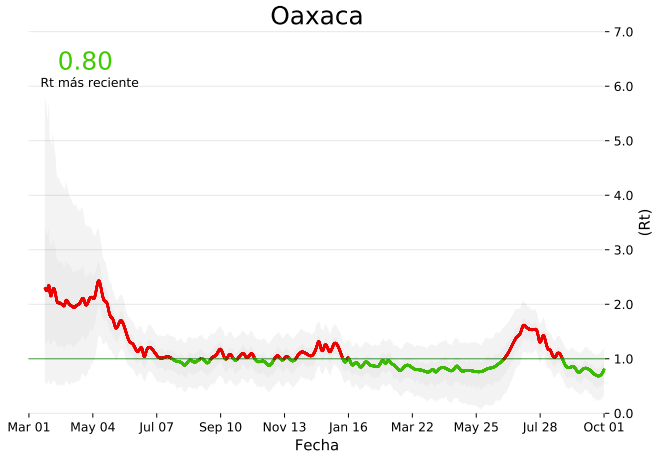
59631	casos totales
3930	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
4861.13	casos por 100mil habitantes
1.59 %	de casos a nivel nacional



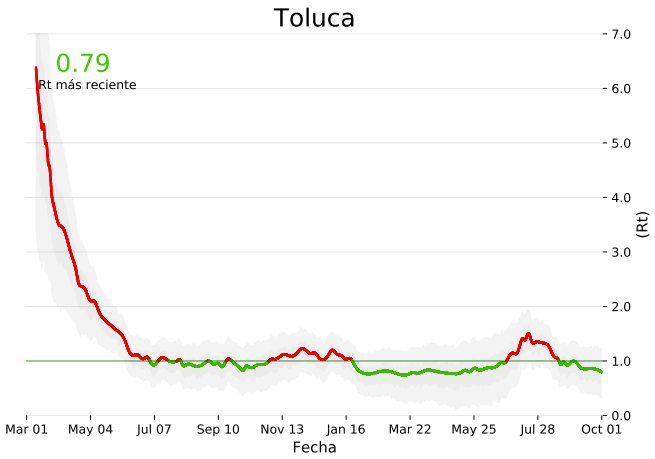
52592	casos totales
3538	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
4249.18	casos por 100mil habitantes
1.41 %	de casos a nivel nacional



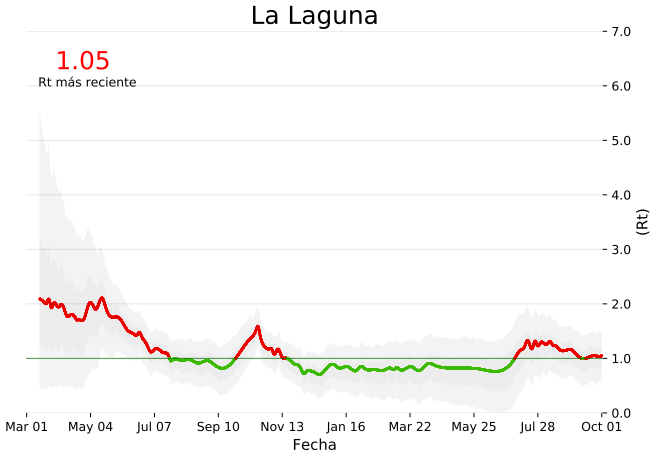
46589	casos totales
2700	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
4924.56	casos por 100mil habitantes
1.25 %	de casos a nivel nacional



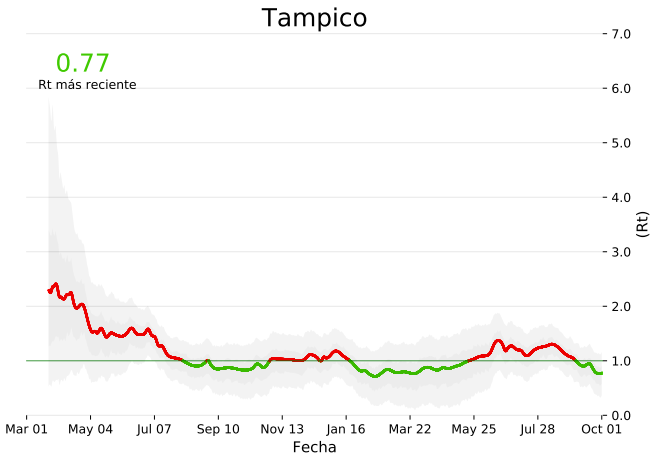
40018	casos totales
1825	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
5726.58	casos por 100mil habitantes
1.07 %	de casos a nivel nacional



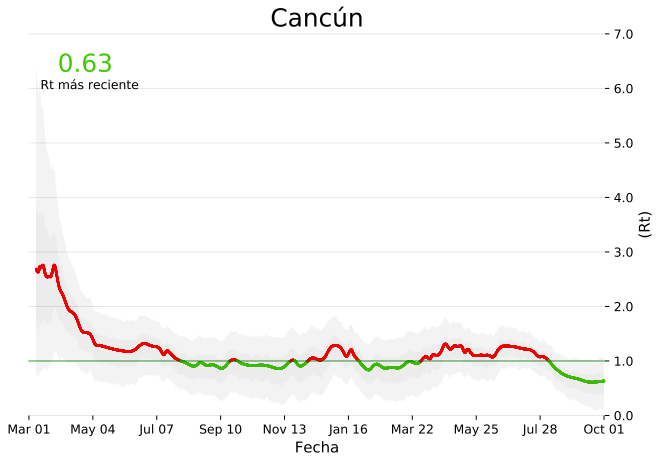
39247	casos totales
5604	defunciones totales
2020-03-03	fecha de inicio
1650.54	casos por 100mil habitantes
1.05 %	de casos a nivel nacional



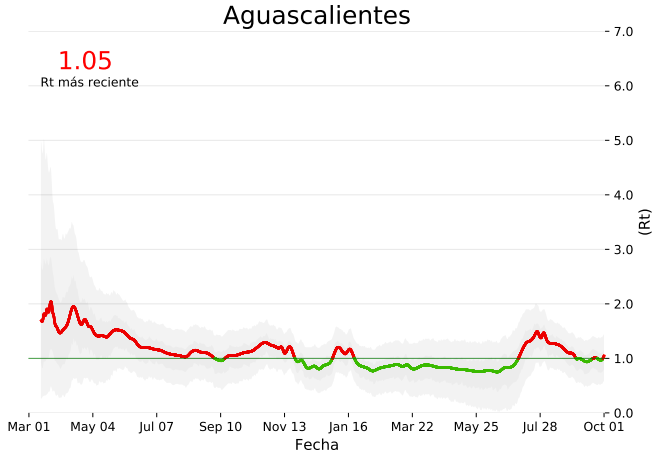
35074	casos totales
2971	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
2397.82	casos por 100mil habitantes
0.94 %	de casos a nivel nacional



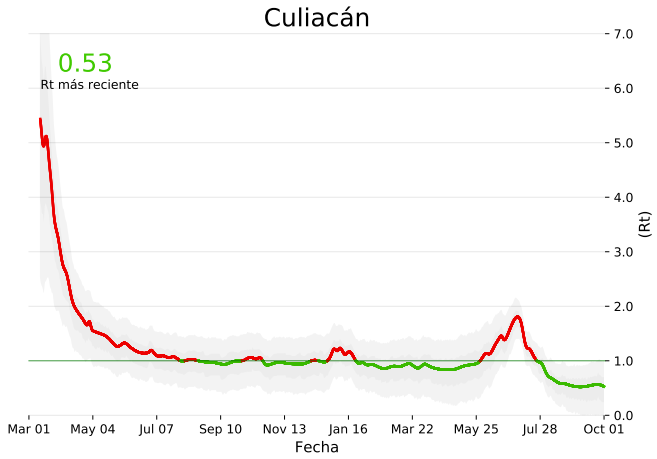
31894	casos totales
1844	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
3252.98	casos por 100mil habitantes
0.85 %	de casos a nivel nacional



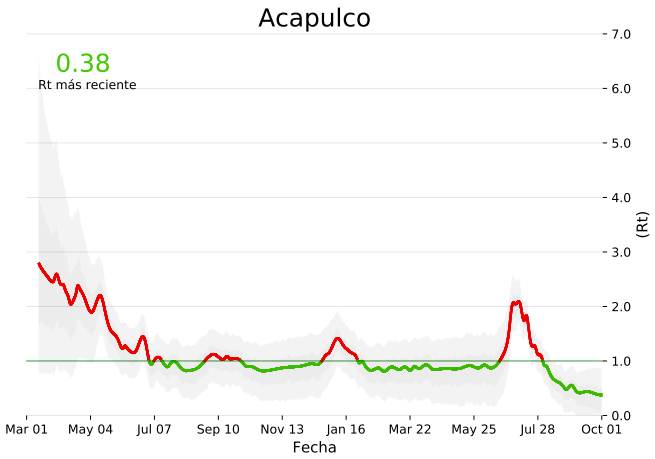
31603	casos totales
2518	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
3641.87	casos por 100mil habitantes
0.85 %	de casos a nivel nacional



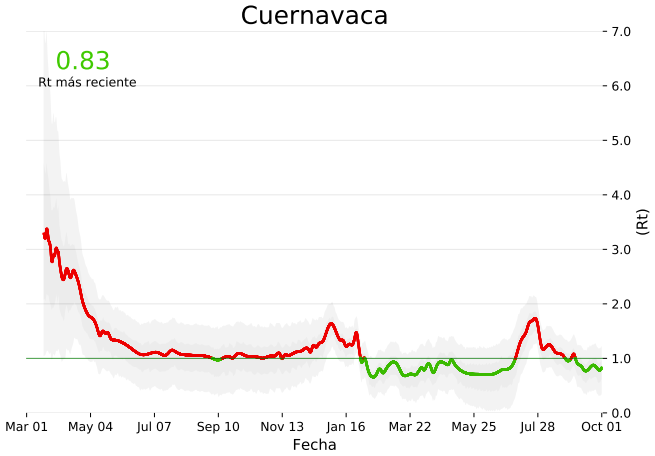
30536	casos totales
2545	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
2669.86	casos por 100mil habitantes
0.82 %	de casos a nivel nacional



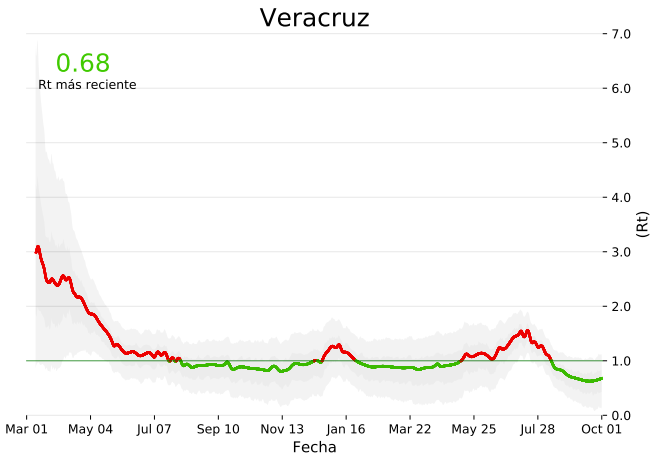
29989	casos totales
3101	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
3114.54	casos por 100mil habitantes
0.80 %	de casos a nivel nacional



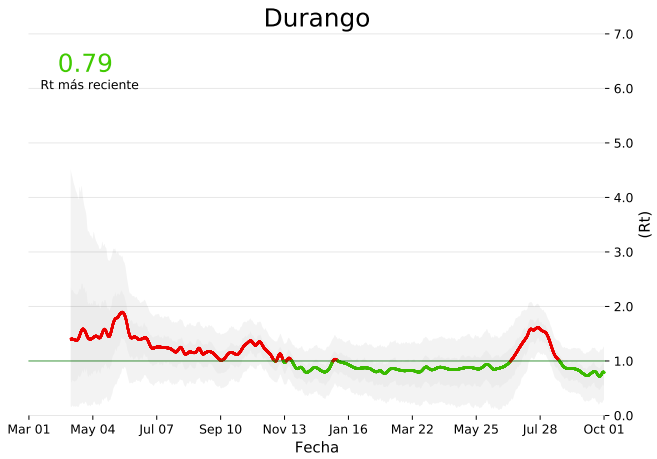
29737	casos totales
2750	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
3233.25	casos por 100mil habitantes
0.80 %	de casos a nivel nacional



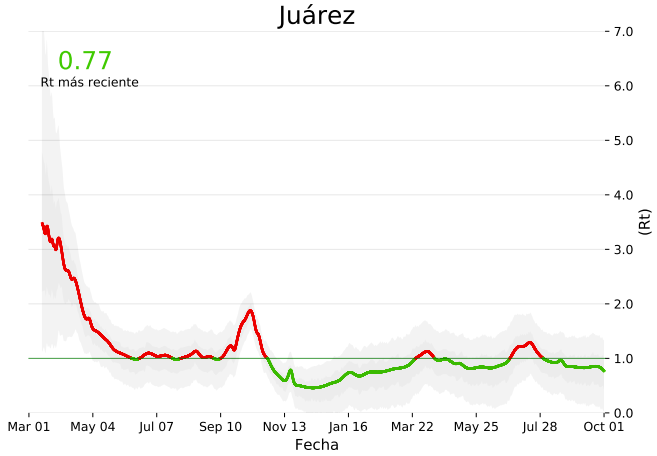
29561	casos totales
2356	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
2790.03	casos por 100mil habitantes
0.79 %	de casos a nivel nacional



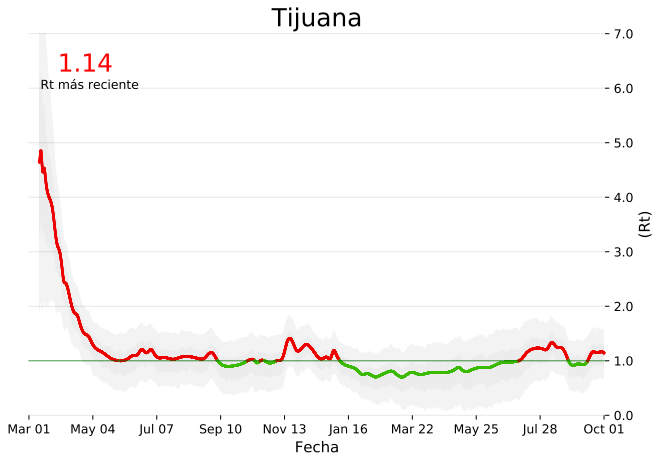
28219	casos totales
2832	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
2950.35	casos por 100mil habitantes
0.75 %	de casos a nivel nacional



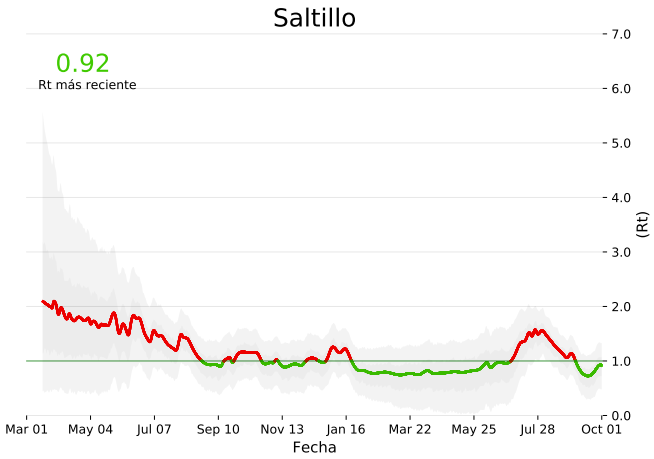
26853	casos totales
1343	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
3860.42	casos por 100mil habitantes
0.72 %	de casos a nivel nacional



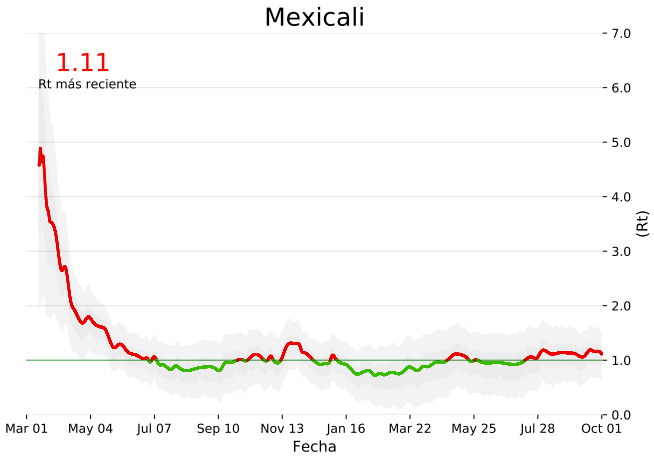
26693	casos totales
3897	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
1822.13	casos por 100mil habitantes
0.71 %	de casos a nivel nacional



26516	casos totales
4593	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
1318.39	casos por 100mil habitantes
0.71 %	de casos a nivel nacional



25795	casos totales
2169	defunciones totales
2020-03-03	fecha de inicio
2584.89	casos por 100mil habitantes
0.69 %	de casos a nivel nacional



25303	casos totales
3490	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
2326.76	casos por 100mil habitantes
0.68 %	de casos a nivel nacional

3.1 Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Zona Metropolitana

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 13 de Octubre de 2021

La figura 3.1 muestra la tasa de crecimiento ($R_t * I$) a lo largo del tiempo para Zonas Metropolitanas, es decir, los casos nuevos esperados por día para la tasa R_t estimada y el número de casos nuevos registrados ese día (I). Se muestra la comparación con la curva nacional (obtenida a partir de los datos por Estado) para observar la contribución de cada una de las Zonas Metropolitanas a la tasa de crecimiento nacional.

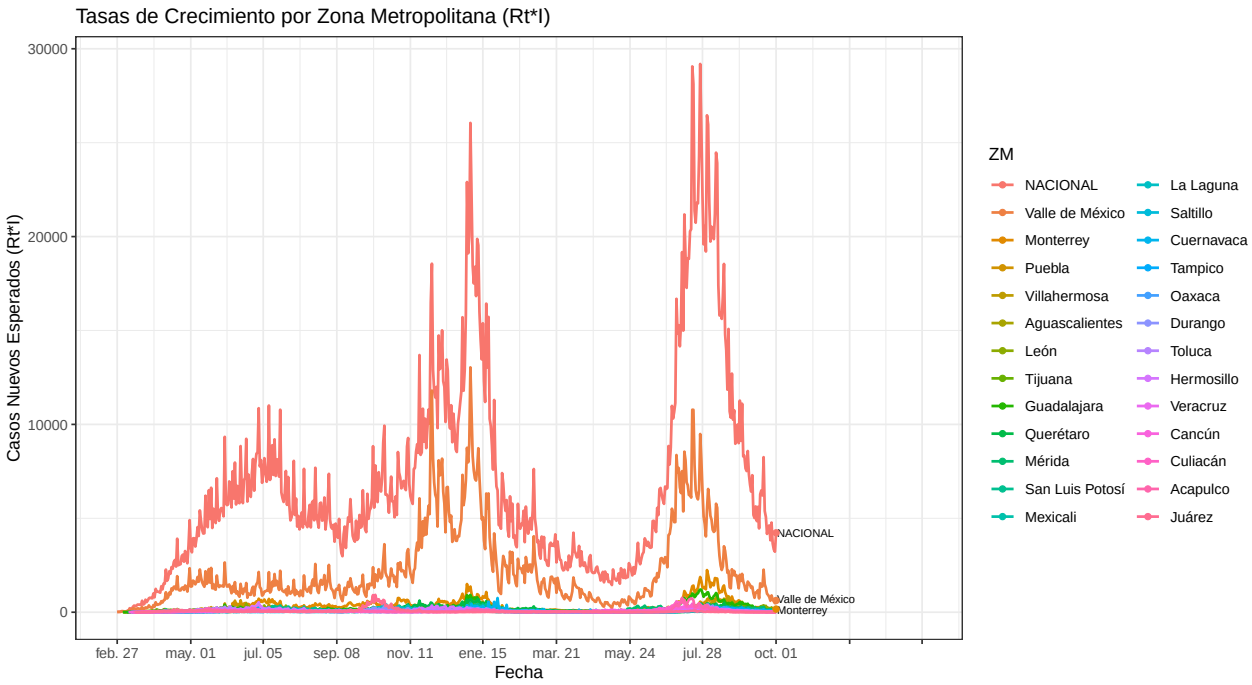


Fig. 3.1: Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Zona Metropolitana.

4. Metodología de Estimación de R_t

4.1 Metodología para la Estimación del R_t.

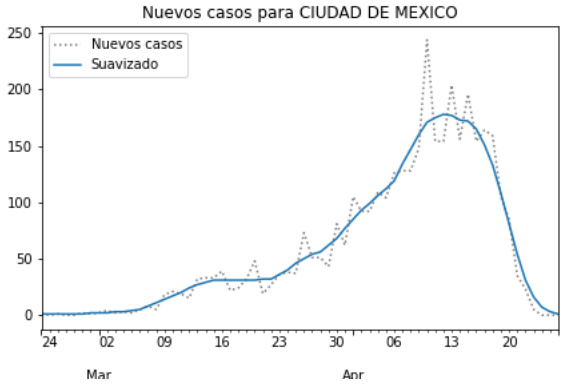
A continuación se resume la metodología utilizada para estimar el valor de la tasa de reproducción R_t cada día por Estados y Zonas Metropolitanas de la República Mexicana. La cual está basada en la propuesta del sitio *Estimating COVID-19's Rt in Real-Time* [1], que estima los valores de R_t para los Estados Unidos de América.

Esta tasa de reproducción es una medida de la rapidez con la que se trasmite la enfermedad COVID-19, pues se refiere al número promedio de personas que son infectadas por una persona infecciosa. Si el valor de R_t es superior a 1.0, la enfermedad continúa su expansión, mientras que si es menor a 1.0 la expansión se está deteniendo.

4.1.1 Datos de entrada para la estimación

Los datos a partir de los cuáles se estiman los valores de R_t corresponden a la información oficial provista por el Gobierno de México, a través de su portal de acceso abierto, respecto a los casos confirmados de COVID-19 en el país (ver el sitio).

Mediante estos datos se determina la serie de nuevos casos confirmados por día para cada uno de los estados, tomando como fecha el día de presentación de los síntomas de cada individuo. Se descartan los datos correspondientes a los últimos 7 días y se aplica un suavizado con promedio móvil ponderado. La siguiente gráfica muestra los nuevos casos diarios para la Ciudad de México hasta el 26 de abril, a manera de ejemplo.



4.1.2 Estimación de la tasa de reproducción efectiva R_t

Se estima la probabilidad a posteriori $P(R_t|k)$ utilizando el Teorema de Bayes, donde t es el día y k es el número de casos nuevos de COVID-19 en ese día:

$$P(R_t|k) = \frac{P(k|R_t) \cdot P(R_t)}{P(k)} \tag{4.1}$$

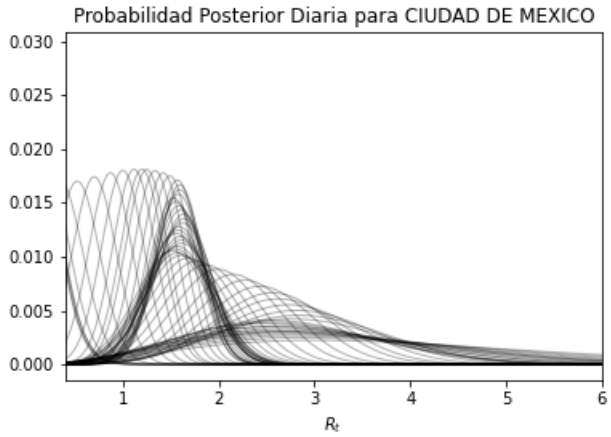
Para **la verosimilitud** $P(k|R_t)$ se propone una distribución Poisson:

$$P\left(k|R_t\right) = \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \tag{4.2}$$

con parámetro $\lambda = k_{t-1}e^{\gamma(R_{t-1})}$, que depende del número de casos nuevos del día anterior y del parámetro $\gamma = 1/12$, pues el invervalo serial es de 12 días.

La **probabilidad a priori** $P(R_t)$ se calcula a partir de la probabilidad a priori del día anterior $P(R_{t-1})$, asumiendo que $P(R_t|R_{t-1})$ sigue una distribución normal centrada en R_{t-1}, es decir $N(R_{t-1}, \sigma)$. Para cada estado o zona metropolitana se selecciona el valor de σ que maximiza la verosimilitud de $P(k|\sigma)$ para un rango de valores propuesto.

Para estimar **la posterior** $P(R_t|k)$ del día t, se fija k, pues se conoce el número de nuevos casos en el día t, y se varía R_t en un rango propuesto entre 0 y 12. Se repite el proceso de manera iterativa para calcular la probabilidad posterior para cada día de la serie. La siguiente figura muestra las distribuciones posteriores diarias obtenidas para la Ciudad de México.



Para cada estado y zona metropolitana se seleccionó un valor de R_0 inicial, a partir del cuál se inicia la estimación del R_t:

Estado	R_0
AGUASCALIENTES	1.6
BAJA CALIFORNIA	4.8
BAJA CALIFORNIA SUR	1.5
CAMPECHE	1.8
COAHUILA	2.1
COLIMA	1.5
CHIAPAS	2.3
CHIHUAHUA	2.8
CIUDAD DE MÉXICO	7.0
DURANGO	1.4
GUANAJUATO	2.2
GUERRERO	2.2
HIDALGO	2.2
JALISCO	2.3
MÉXICO	6.0
MICHOACÁN	1.7
MORELOS	2.8
NAYARIT	1.9
NUEVO LEÓN	2.2
OAXACA	1.9
PUEBLA	3.1
QUERÉTARO	1.7
QUINTANA ROO	2.5
SAN LUIS POTOSÍ	1.4
SINALOA	5.0
SONORA	2.5
TABASCO	3.2
TAMAULIPAS	2.4
TLAXCALA	2.6
VERACRUZ	3.0
YUCATÁN	1.8
ZACATECAS	1.4

Zona Metropolitana	R_0
Valle de México	7.0
Monterrey	2.0
Guadalajara	2.3
Puebla	3.3
Querétaro	2.0
Villahermosa	3.6
León	2.5
San Luis Potosí	1.4
Mérida	2.1
Hermosillo	2.7
Oaxaca	2.3
Toluca	6.5
La Laguna	2.1
Tampico	2.3
Cancún	2.7
Aguascalientes	1.7
Culiacán	5.5
Acapulco	2.8
Cuernavaca	3.3
Veracruz	3.0
Durango	1.4
Juárez	3.5
Tijuana	4.8
Saltillo	2.1
Mexicali	4.8

Tabla 4.1

Finalmente para cada día se calculan los **intervalos de máxima densidad (HDI)** para el 50 % y el 90 %, así como el valor de máxima verosimilitud (ML), a partir de la posterior $P(R_t|k)$. La

siguiente tabla muestra los valores estimados para 5 días de la Ciudad de México, a manera de ejemplo.

date	ML	Low_50	High_50	Low_90	High_90
2020-04-22	0.81	0.59	0.92	0.40	1.19
2020-04-23	0.79	0.59	0.92	0.38	1.18
2020-04-24	0.80	0.57	0.91	0.38	1.19
2020-04-25	0.81	0.59	0.93	0.37	1.19
2020-04-26	0.82	0.62	0.96	0.38	1.21

Referencias

[1] Systrom K. (2020). Estimating COVID-1's Rt in Real-Time. Del sitio https://github.com/k-sys/covid-19/blob/master/Realtime%20R0.ipynb

[2] Systrom K., Vladeck T. & Krieger M. (2020). Rt Covid-19. Del sitio https://rt.live/