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

15 de Julio de 2020

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.

15 de Julio de 2020

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 15 de Julio de 2020

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 09 de Julio de 2020. 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 %.

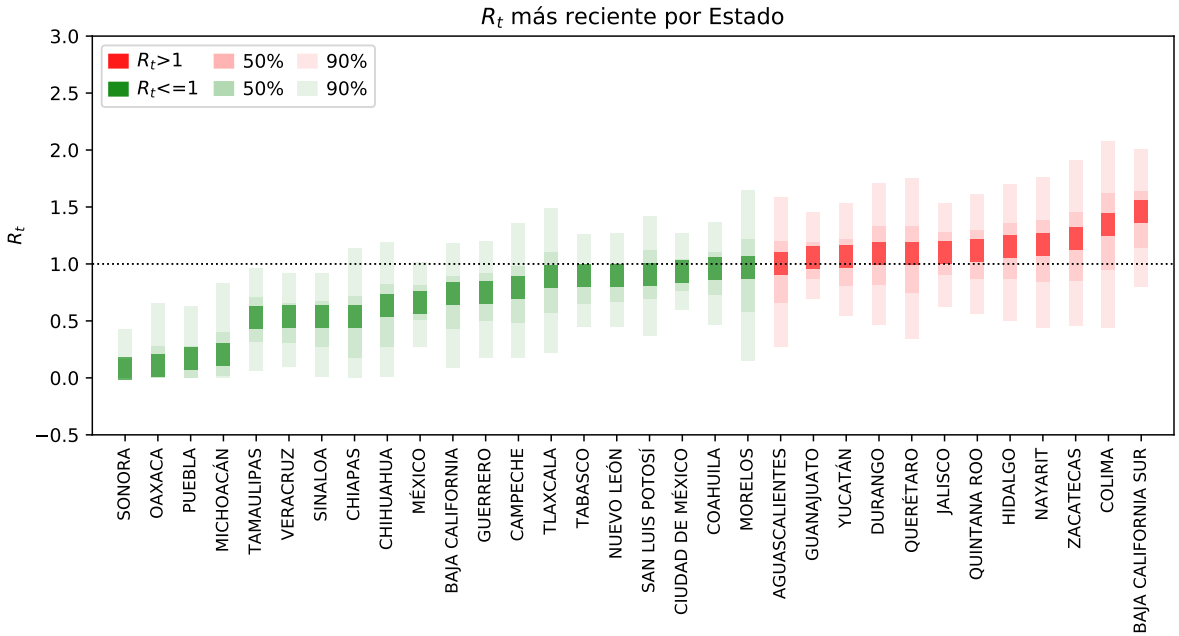


Fig. 1.1: Valor de R_t más reciente para los 32 estados de México.

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 15 de Julio de 2020

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 09 de Julio de 2020. 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 %.

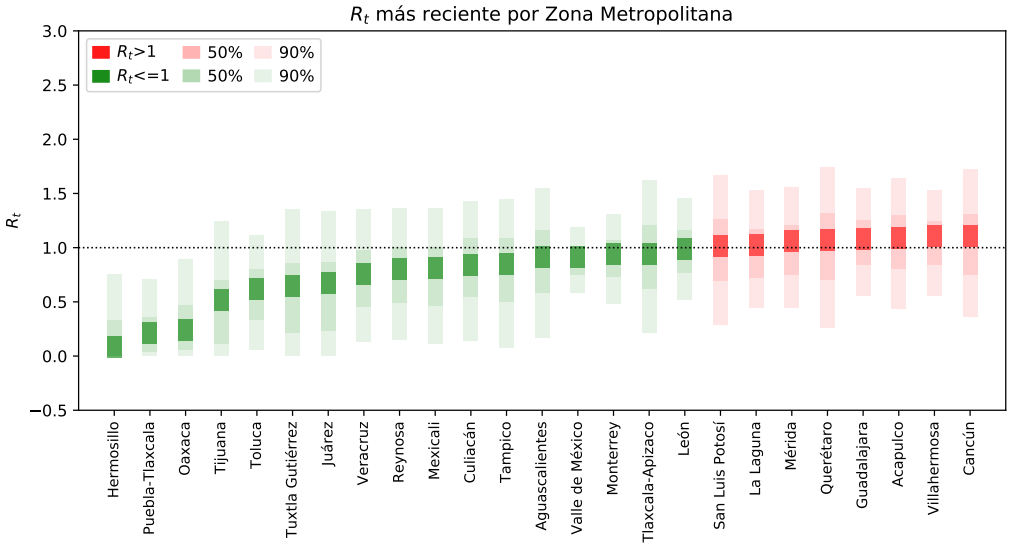


Fig. 1.2: Valor de R_t más reciente para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos.

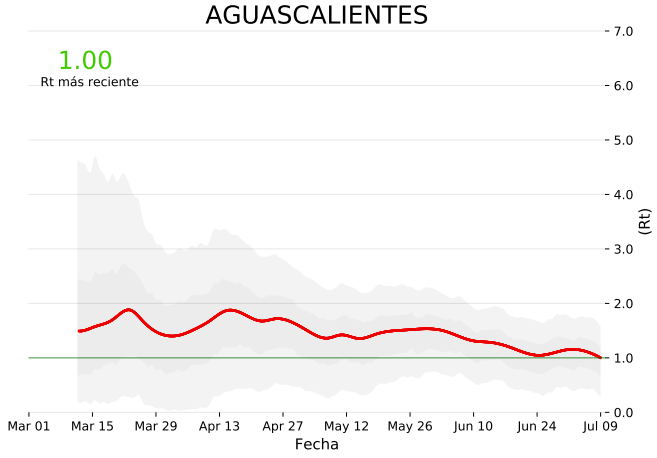
CONACYT

CIMAT

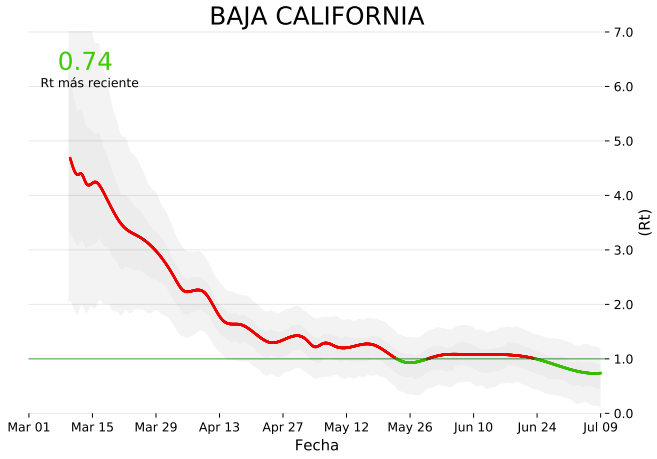
2. Estimaciones de R_t por Estado

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Julio de 2020

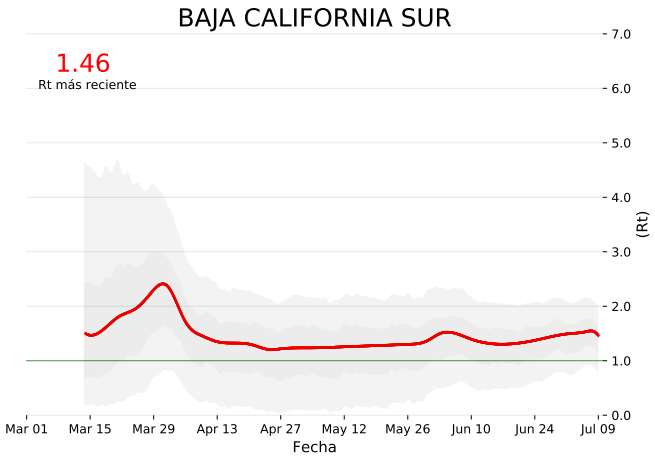
A contiuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa R_t a lo largo del tiempo para los 32 estados de México. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 09 de Julio de 2020, es decir, 7 días anteriores de la fecha de elaboración de este reporte.



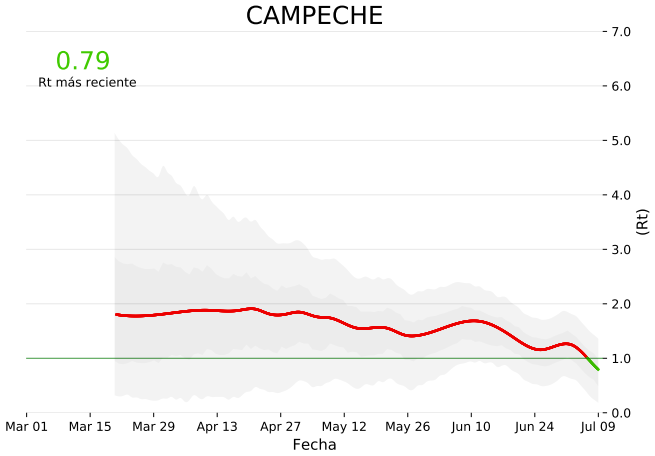
3083	casos totales
187	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
214.90	casos por 100mil habitantes
0.97 %	de casos a nivel nacional



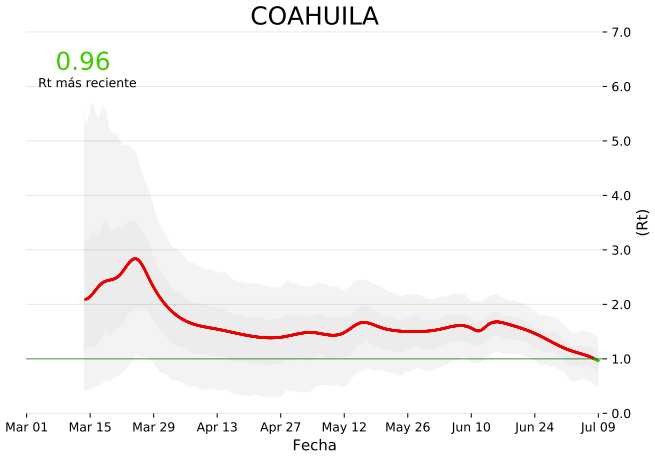
11247	casos totales
2268	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
309.42	casos por 100mil habitantes
3.54 %	de casos a nivel nacional



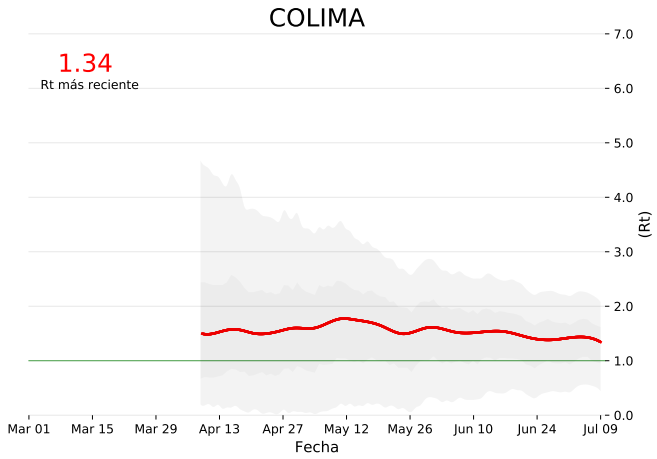
2603	casos totales
108	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
323.47	casos por 100mil habitantes
0.82 %	de casos a nivel nacional



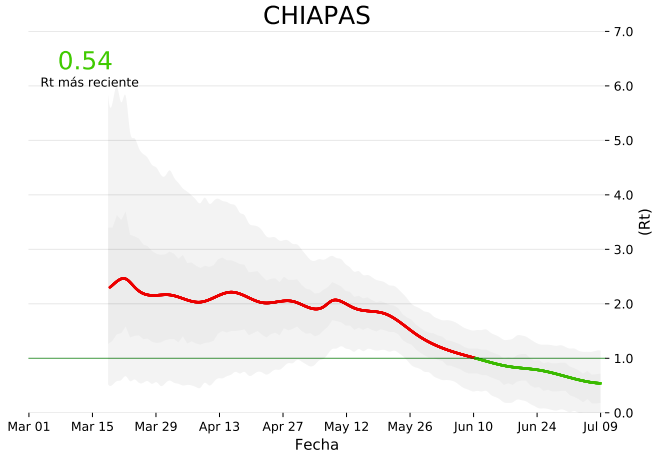
3182	casos totales
307	defunciones totales
2020-03-08	fecha de inicio
318.00	casos por 100mil habitantes
1.00 %	de casos a nivel nacional



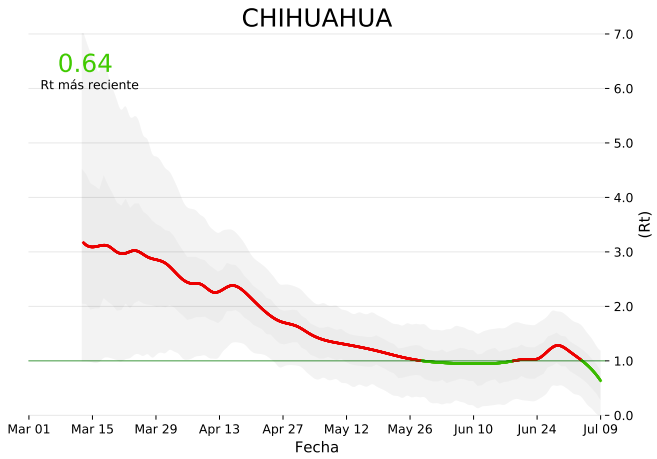
7988	casos totales
402	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
248.17	casos por 100mil habitantes
2.51 %	de casos a nivel nacional



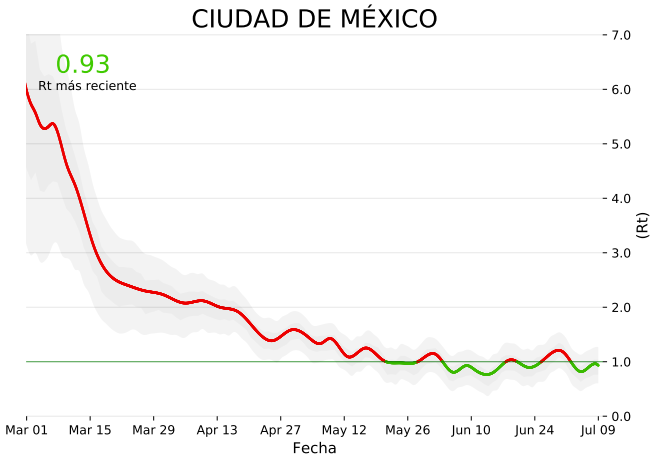
980	casos totales
107	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
124.82	casos por 100mil habitantes
0.31 %	de casos a nivel nacional



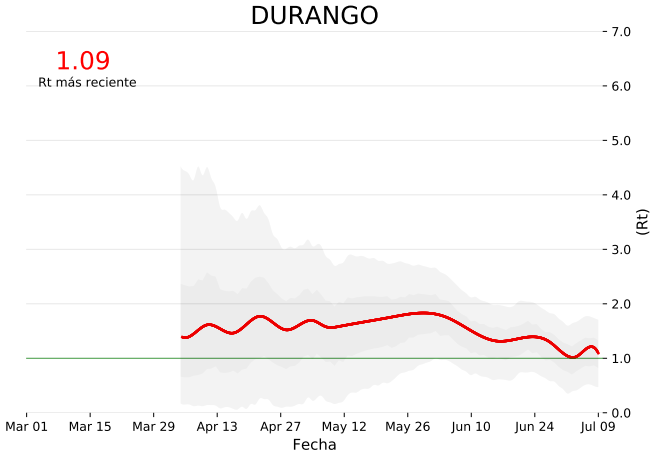
5308	casos totales
827	defunciones totales
2020-02-29	fecha de inicio
92.63	casos por 100mil habitantes
1.67 %	de casos a nivel nacional



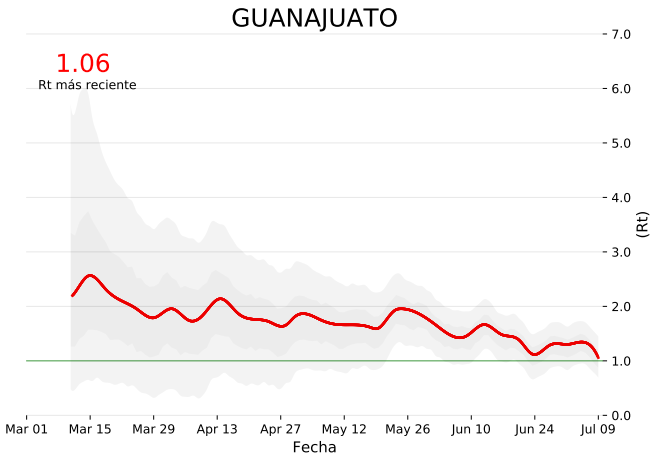
4092	casos totales
777	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
107.64	casos por 100mil habitantes
1.29 %	de casos a nivel nacional



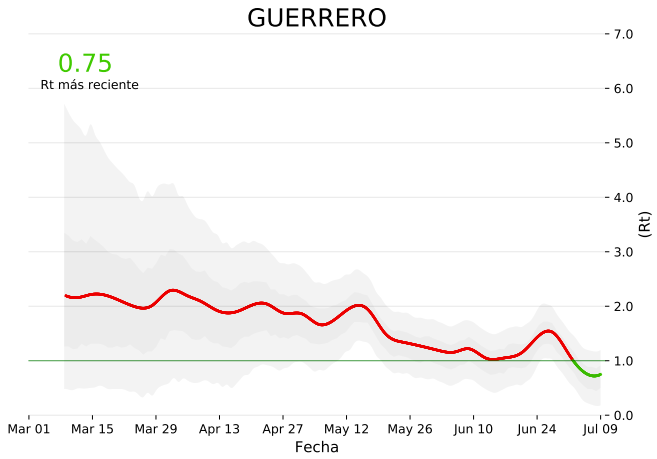
59670	casos totales
6463	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
661.63	casos por 100mil habitantes
18.79 %	de casos a nivel nacional



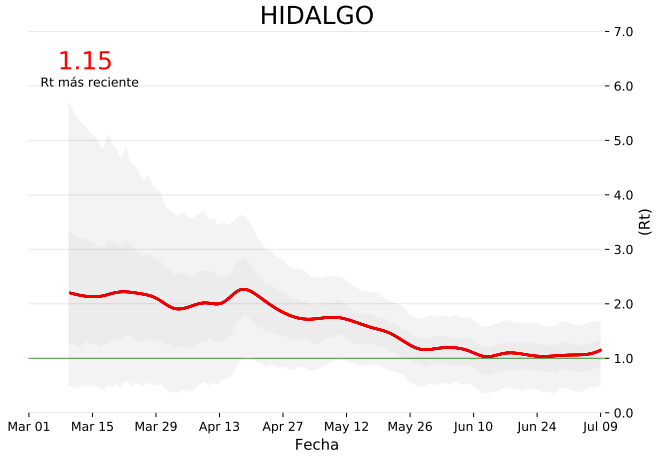
2924	casos totales
218	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
156.45	casos por 100mil habitantes
0.92 %	de casos a nivel nacional



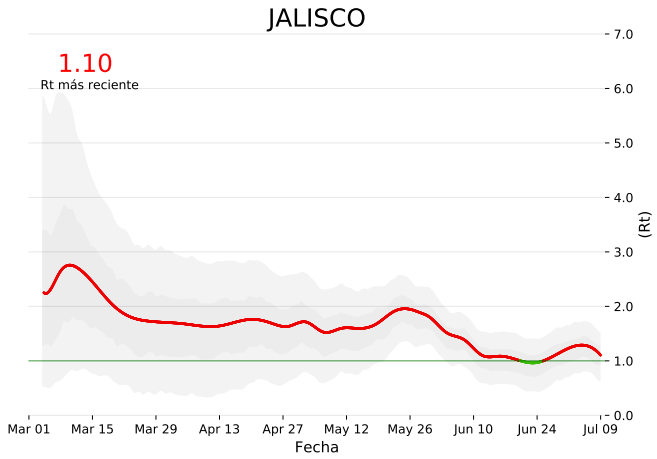
13329	casos totales
675	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
214.01	casos por 100mil habitantes
4.20 %	de casos a nivel nacional



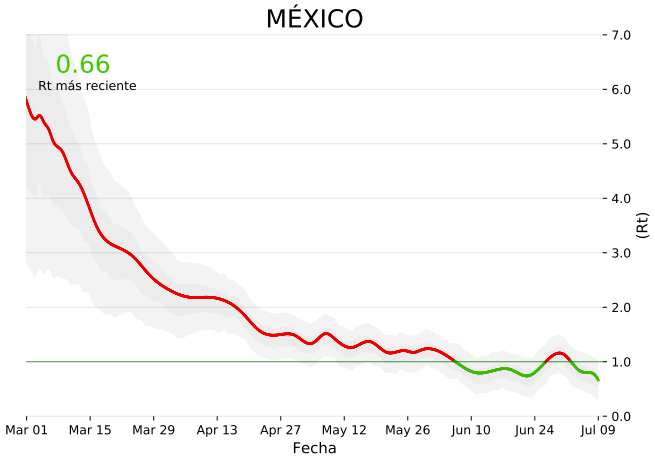
8149	casos totales
1151	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
222.83	casos por 100mil habitantes
2.57 %	de casos a nivel nacional



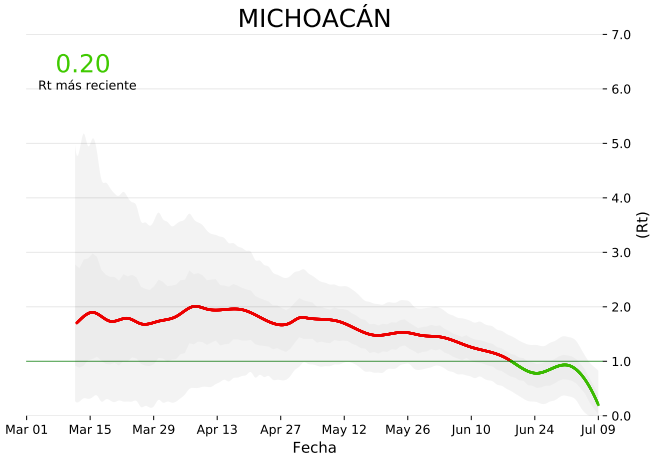
5035	casos totales
781	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
163.13	casos por 100mil habitantes
1.59 %	de casos a nivel nacional



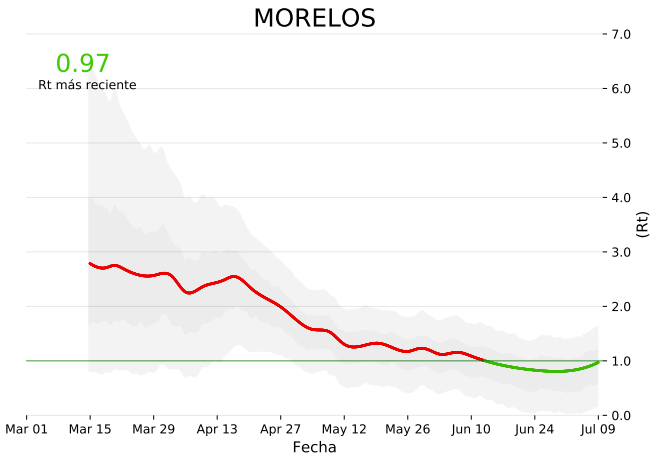
9760	casos totales
1097	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
116.06	casos por 100mil habitantes
3.07 %	de casos a nivel nacional



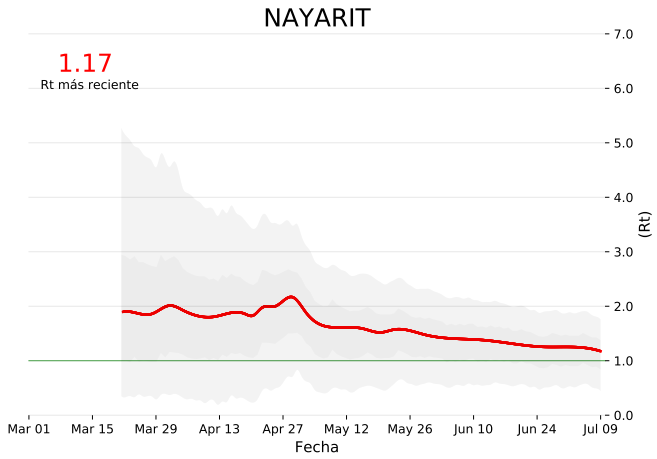
44117	casos totales
6915	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
253.14	casos por 100mil habitantes
13.89 %	de casos a nivel nacional



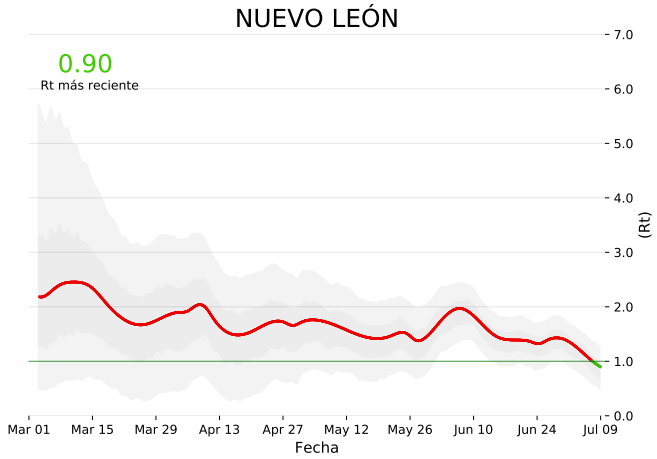
7430	casos totales
602	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
153.98	casos por 100mil habitantes
2.34 %	de casos a nivel nacional



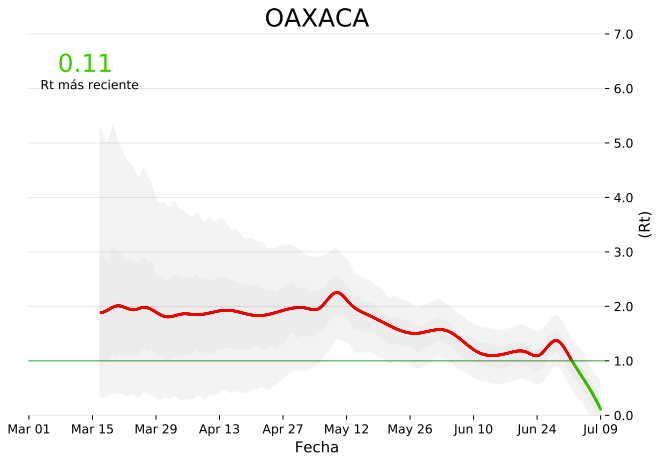
3456	casos totales
754	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
169.08	casos por 100mil habitantes
1.09 %	de casos a nivel nacional



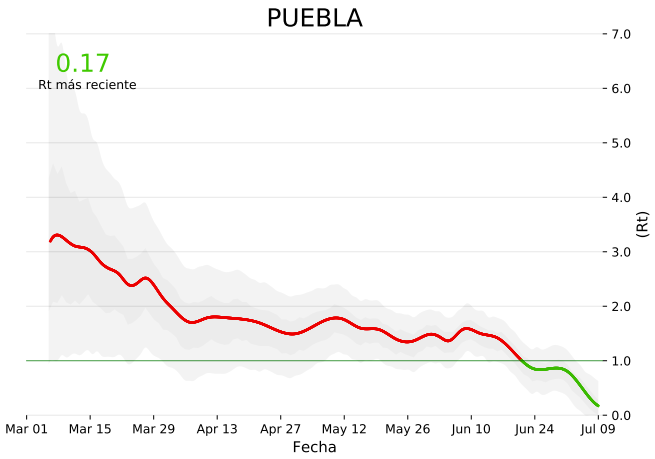
2527	casos totales
263	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
196.11	casos por 100mil habitantes
0.80 %	de casos a nivel nacional



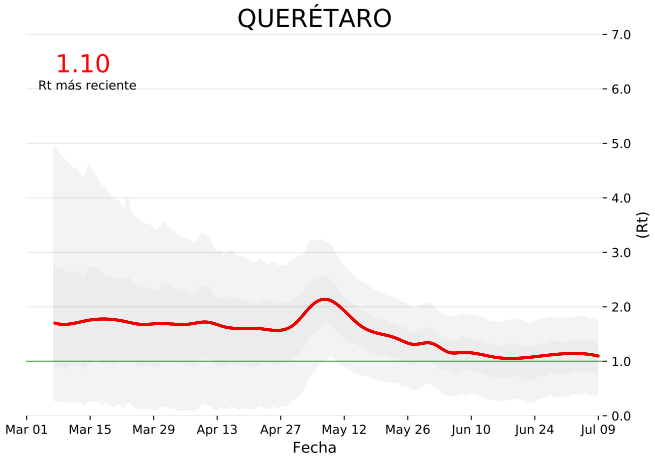
10830	casos totales
591	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
193.04	casos por 100mil habitantes
3.41 %	de casos a nivel nacional



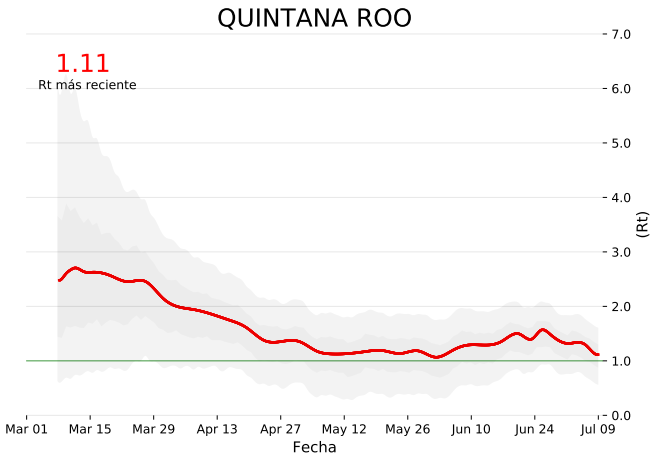
8029	casos totales
777	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
193.77	casos por 100mil habitantes
2.53 %	de casos a nivel nacional



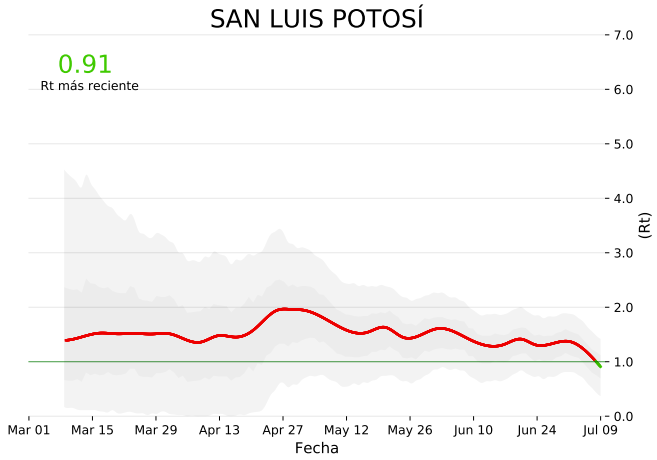
14876	casos totales
1830	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
225.24	casos por 100mil habitantes
4.68 %	de casos a nivel nacional



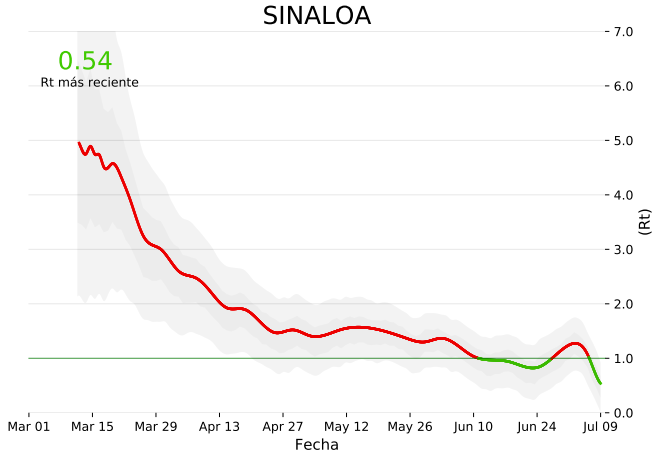
2667	casos totales
359	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
116.99	casos por 100mil habitantes
0.84 %	de casos a nivel nacional



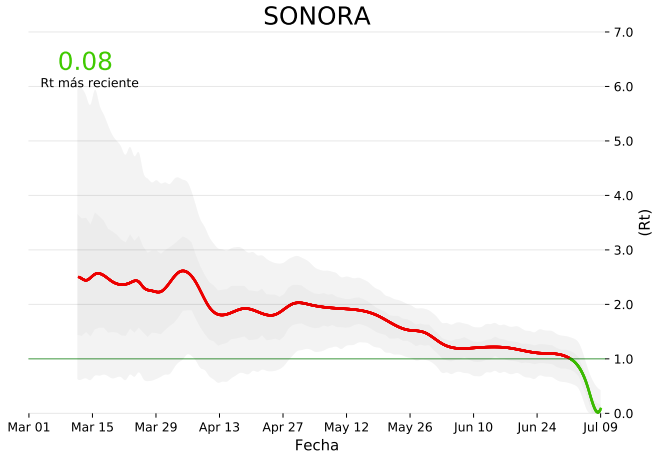
5533	casos totales
748	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
321.08	casos por 100mil habitantes
1.74 %	de casos a nivel nacional



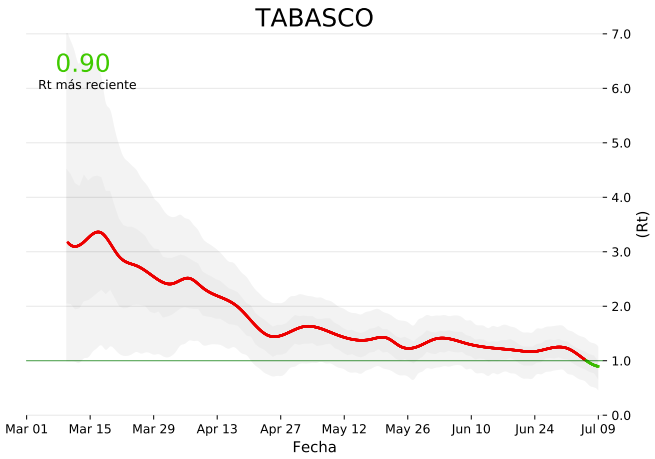
5002	casos totales
281	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
174.52	casos por 100mil habitantes
1.57 %	de casos a nivel nacional



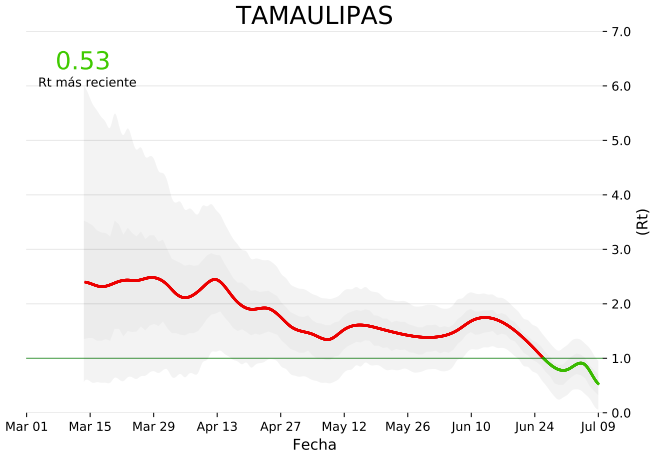
10748	casos totales
1707	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
340.48	casos por 100mil habitantes
3.38 %	de casos a nivel nacional



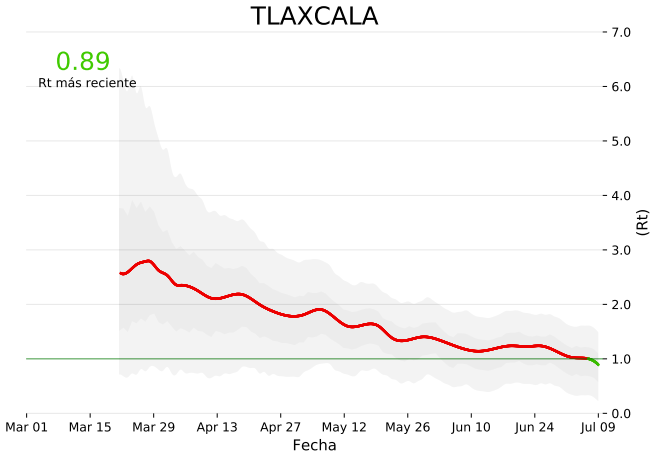
12712	casos totales
1281	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
413.43	casos por 100mil habitantes
4.00 %	de casos a nivel nacional



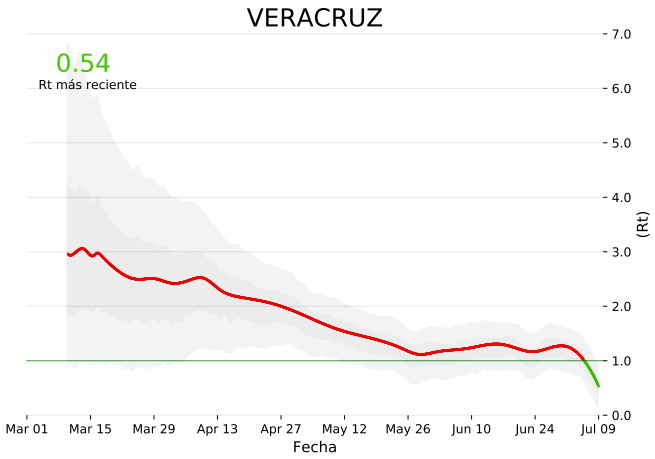
15909	casos totales
1462	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
618.48	casos por 100mil habitantes
5.01 %	de casos a nivel nacional



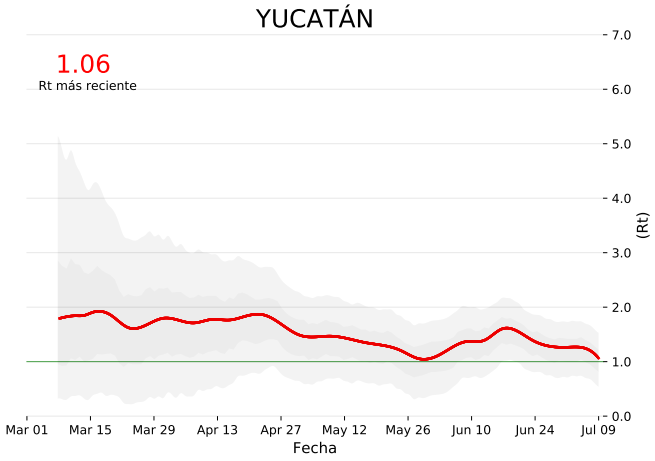
9687	casos totales
620	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
265.35	casos por 100mil habitantes
3.05 %	de casos a nivel nacional



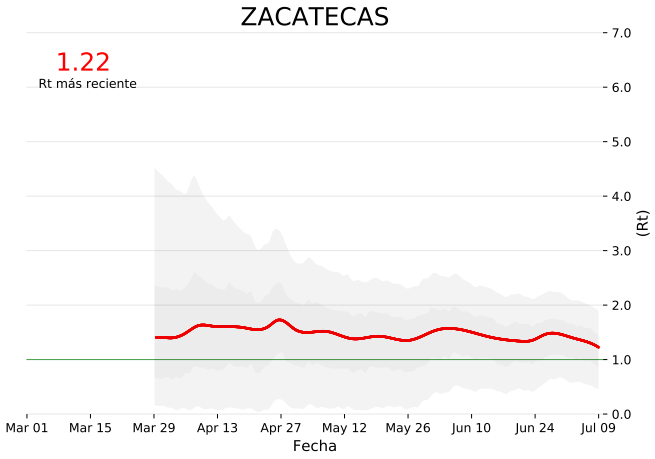
3499	casos totales
504	defunciones totales
2020-03-23	fecha de inicio
253.55	casos por 100mil habitantes
1.10 %	de casos a nivel nacional



15073	casos totales
2094	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
176.50	casos por 100mil habitantes
4.75 %	de casos a nivel nacional



6674	casos totales
602	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
295.43	casos por 100mil habitantes
2.10 %	de casos a nivel nacional



1516	casos totales
148	defunciones totales
2020-03-16	fecha de inicio
90.97	casos por 100mil habitantes
0.48 %	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 15 de Julio de 2020

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.

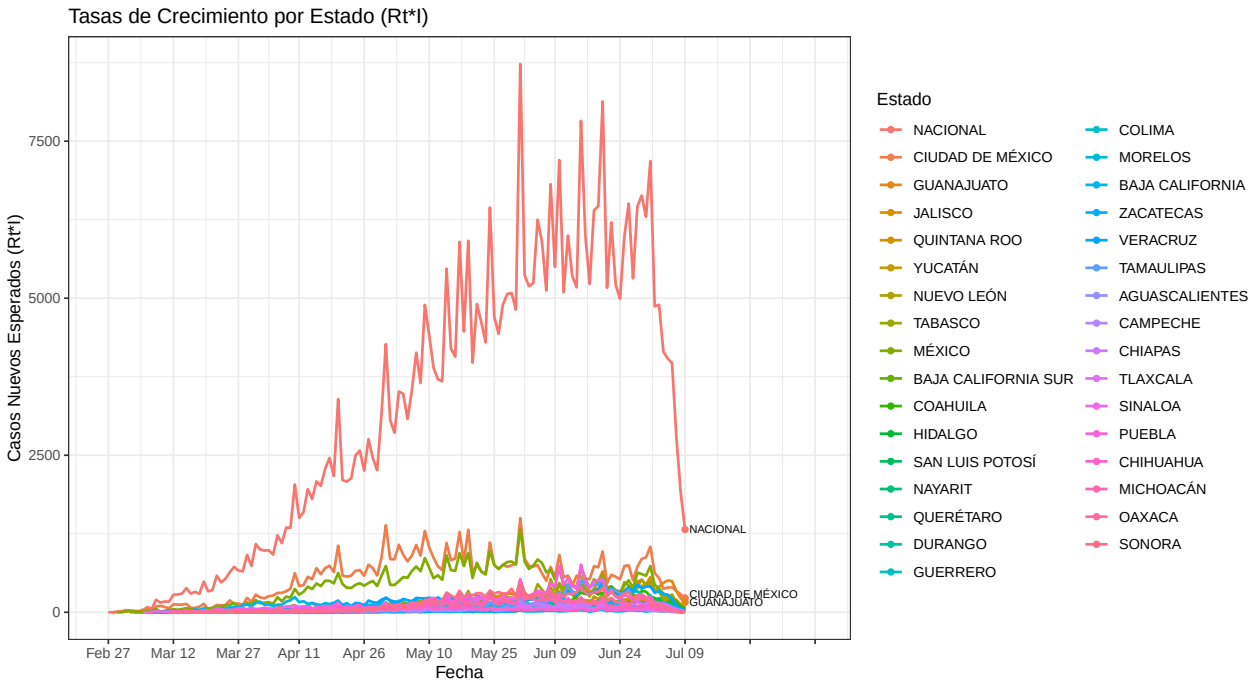
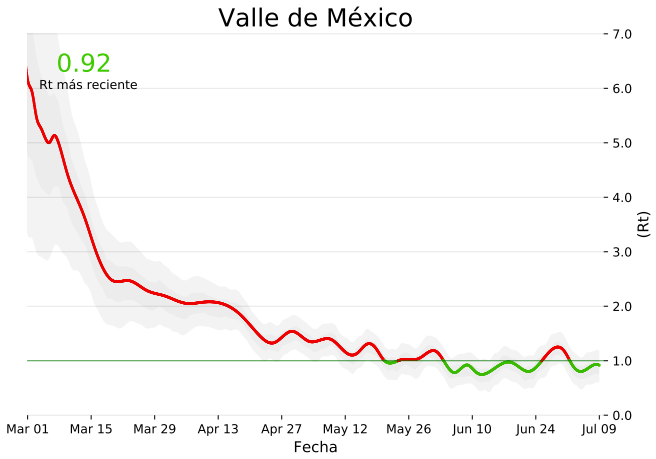


Fig. 2.1: Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Estado.

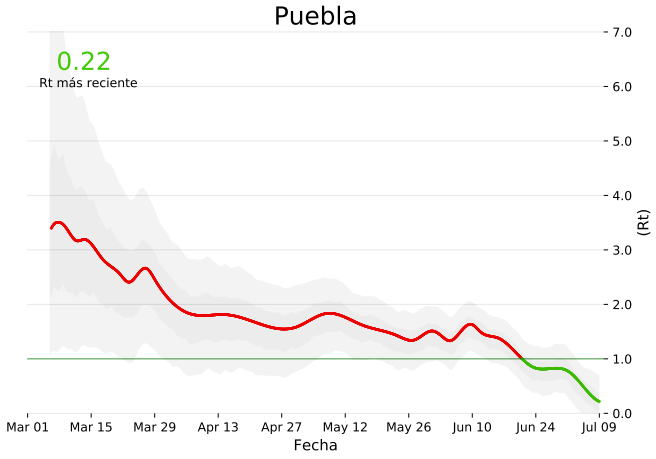
3. Estimaciones de R_t por Zona Metropolitana

Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 15 de Julio de 2020

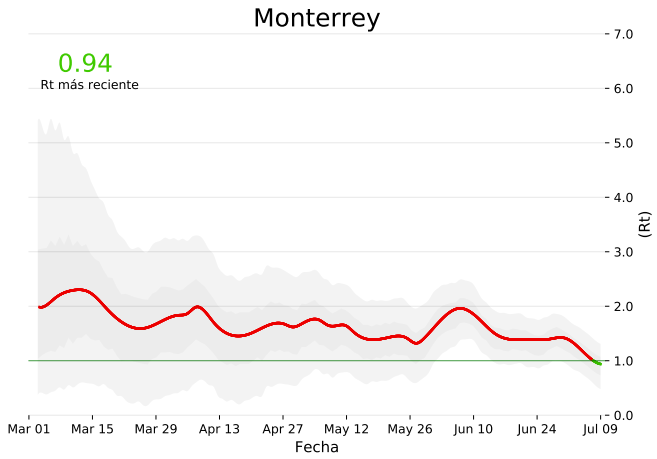
A contiuación se muestran las gráficas del comportamiento de la tasa R_t a lo largo del tiempo para las 25 Zonas Metropolitanas con mayor número de casos de COVID-19. La fecha inicial se toma a partir de la cual existen datos suficientes para hacer la estimación, mientras que la fecha final corresponde al 09 de Julio de 2020, es decir, 7 días anteriores de la fecha de elaboración de este reporte.



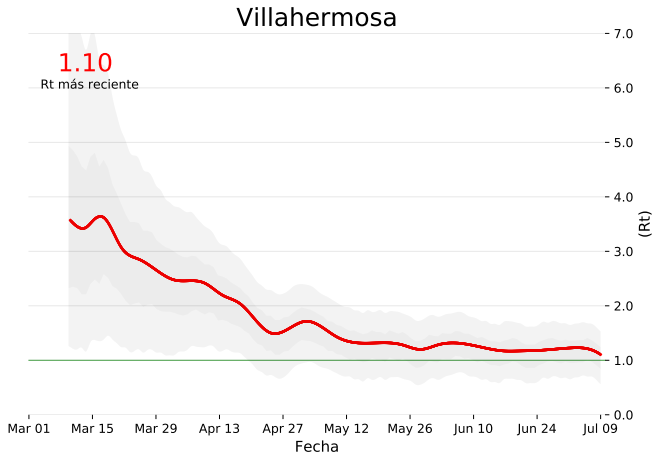
94097	casos totales
12011	defunciones totales
2020-02-27	fecha de inicio
428.83	casos por 100mil habitantes
29.62 %	de casos a nivel nacional



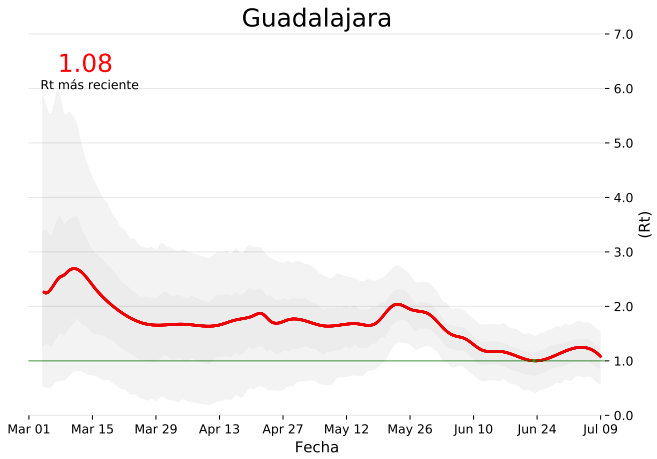
12512	casos totales
1478	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
393.56	casos por 100mil habitantes
3.94 %	de casos a nivel nacional



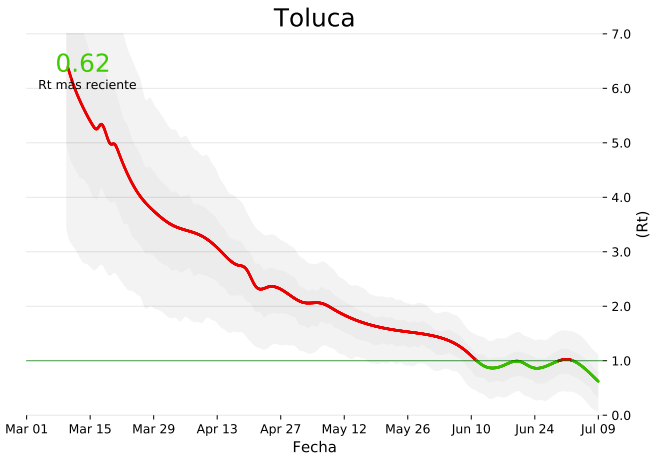
10096	casos totales
570	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
196.65	casos por 100mil habitantes
3.18 %	de casos a nivel nacional



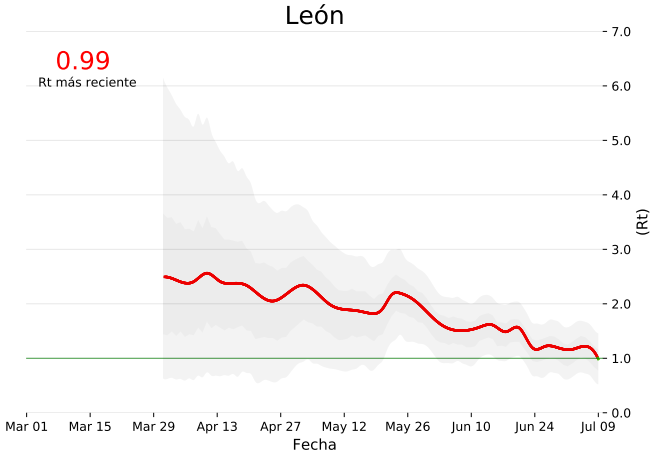
8256	casos totales
737	defunciones totales
2020-03-18	fecha de inicio
928.82	casos por 100mil habitantes
2.60 %	de casos a nivel nacional



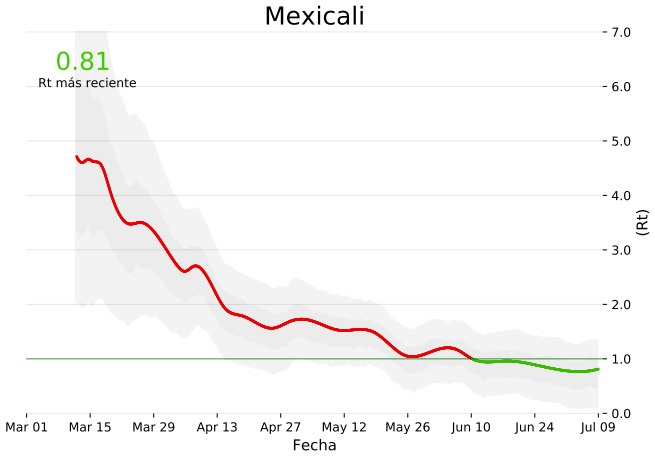
7144	casos totales
822	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
136.25	casos por 100mil habitantes
2.25 %	de casos a nivel nacional



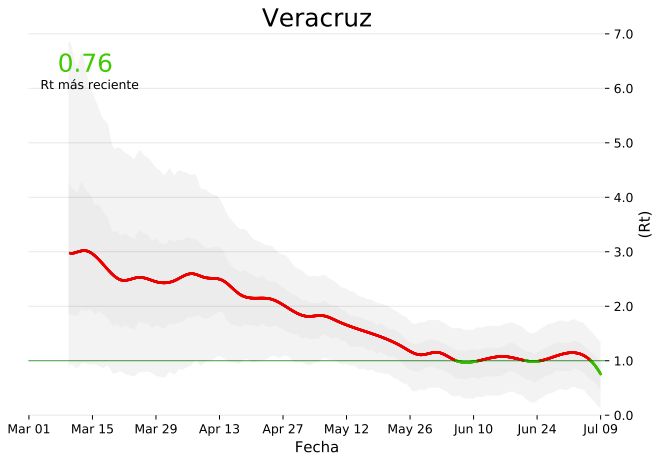
6978	casos totales
1041	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
293.46	casos por 100mil habitantes
2.20 %	de casos a nivel nacional



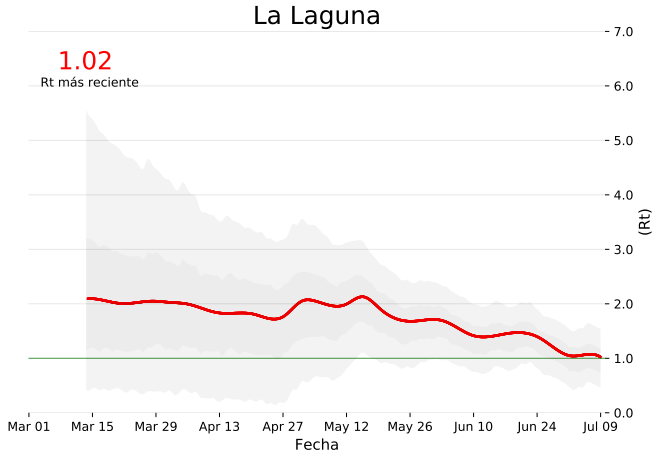
6812	casos totales
365	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
362.22	casos por 100mil habitantes
2.14 %	de casos a nivel nacional



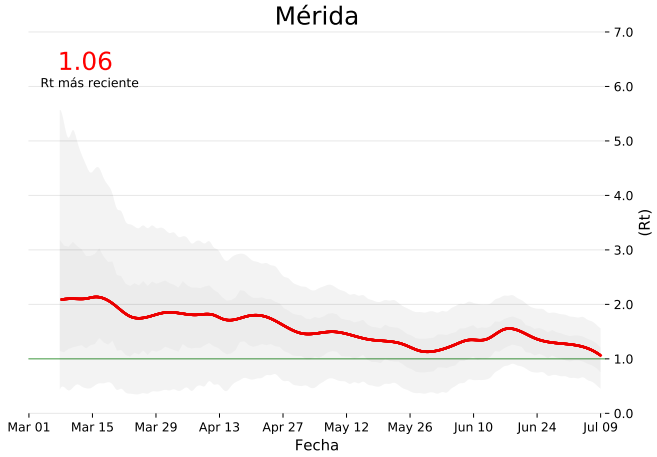
6219	casos totales
1079	defunciones totales
2020-03-11	fecha de inicio
571.87	casos por 100mil habitantes
1.96 %	de casos a nivel nacional



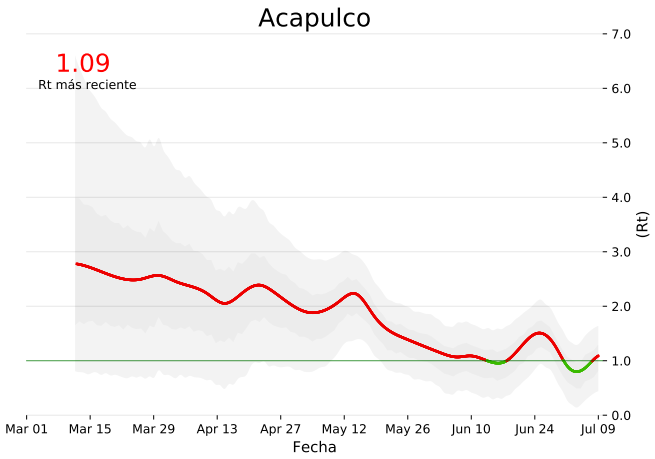
4813	casos totales
654	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
503.21	casos por 100mil habitantes
1.52 %	de casos a nivel nacional



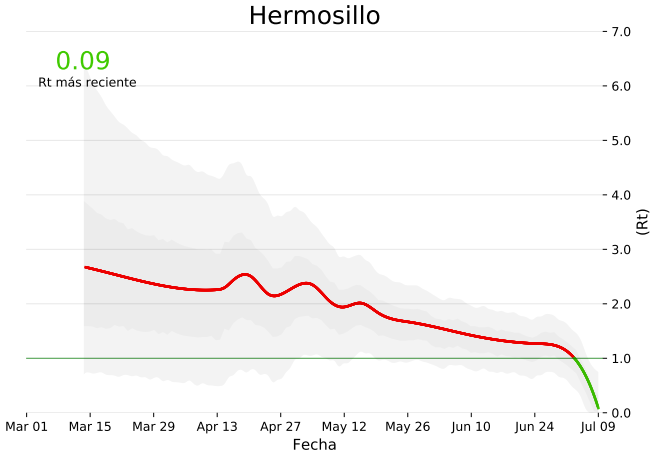
4711	casos totales
271	defunciones totales
2020-02-28	fecha de inicio
322.07	casos por 100mil habitantes
1.48 %	de casos a nivel nacional



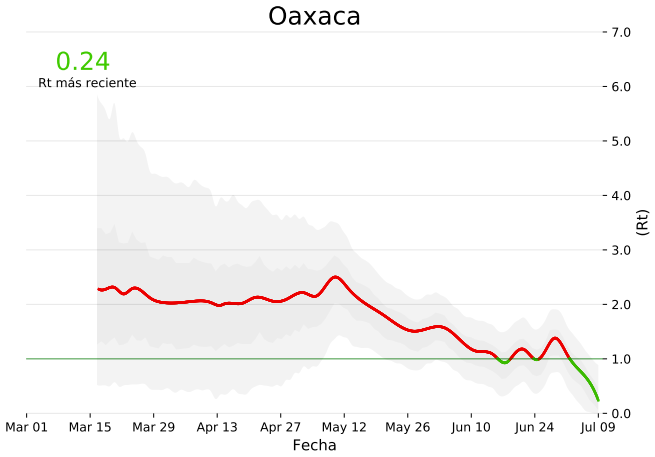
4640	casos totales
402	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
374.89	casos por 100mil habitantes
1.46 %	de casos a nivel nacional



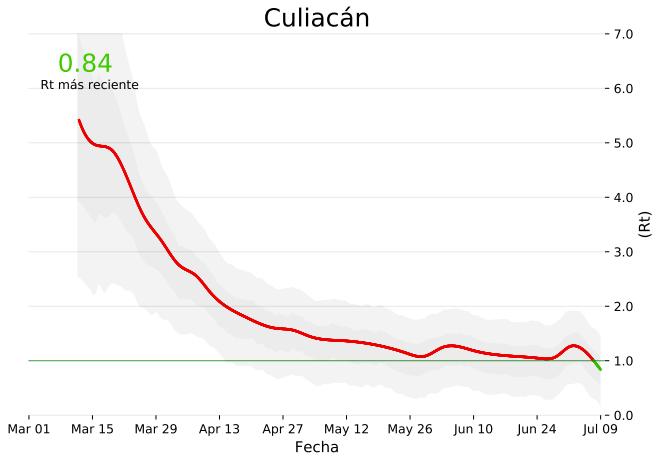
4635	casos totales
614	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
503.95	casos por 100mil habitantes
1.46 %	de casos a nivel nacional



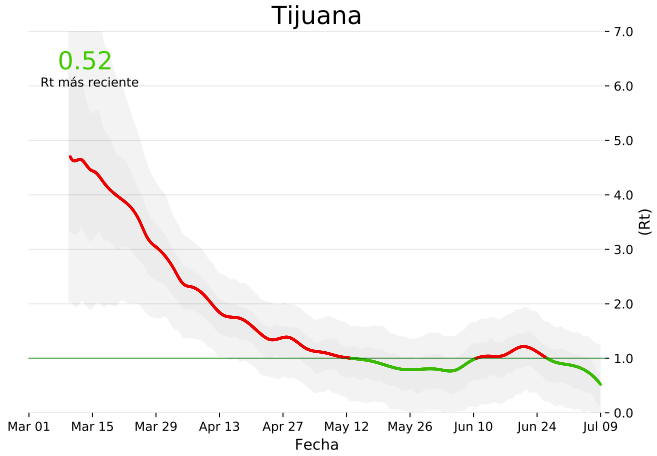
4587	casos totales
270	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
484.86	casos por 100mil habitantes
1.44 %	de casos a nivel nacional



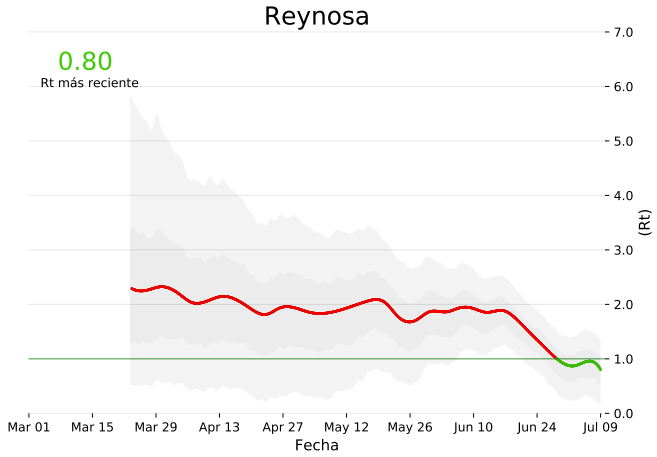
4378	casos totales
335	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
626.49	casos por 100mil habitantes
1.38 %	de casos a nivel nacional



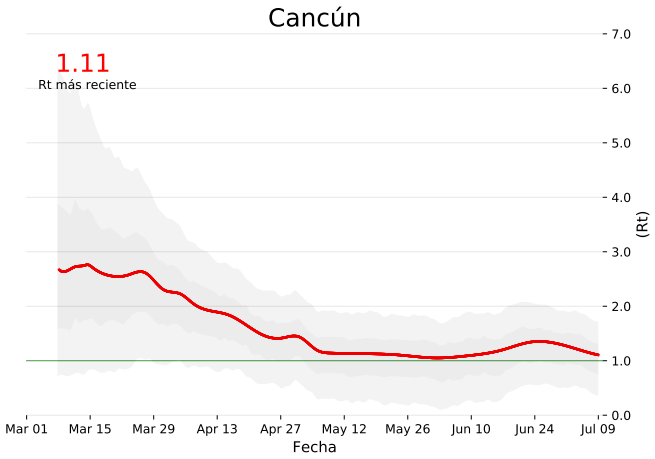
3685	casos totales
642	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
382.71	casos por 100mil habitantes
1.16 %	de casos a nivel nacional



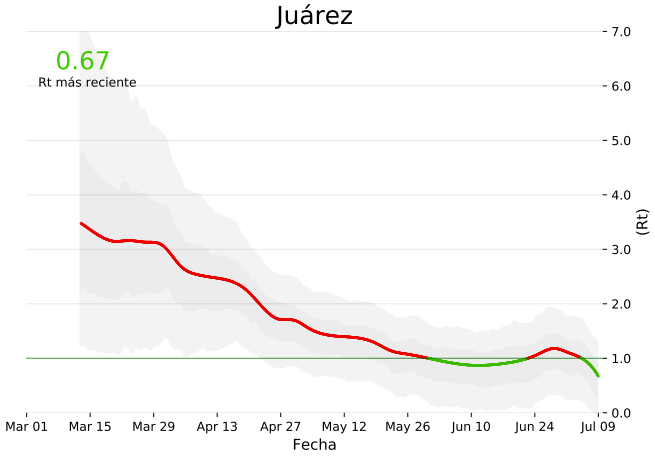
3684	casos totales
1047	defunciones totales
2020-03-17	fecha de inicio
183.17	casos por 100mil habitantes
1.16 %	de casos a nivel nacional



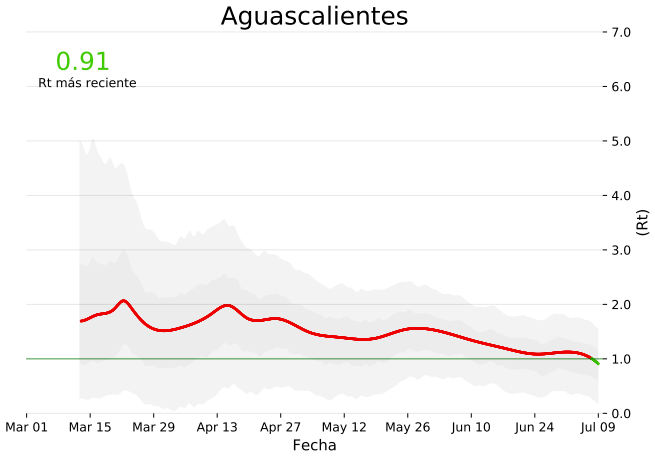
3127	casos totales
228	defunciones totales
2020-03-16	fecha de inicio
381.40	casos por 100mil habitantes
0.98 %	de casos a nivel nacional



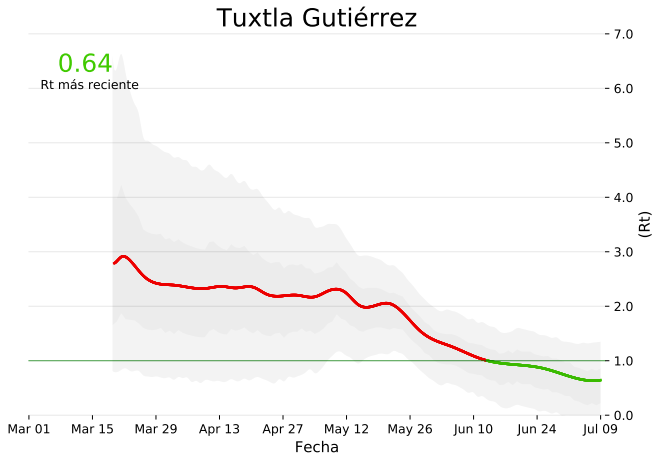
2958	casos totales
559	defunciones totales
2020-03-12	fecha de inicio
340.87	casos por 100mil habitantes
0.93 %	de casos a nivel nacional



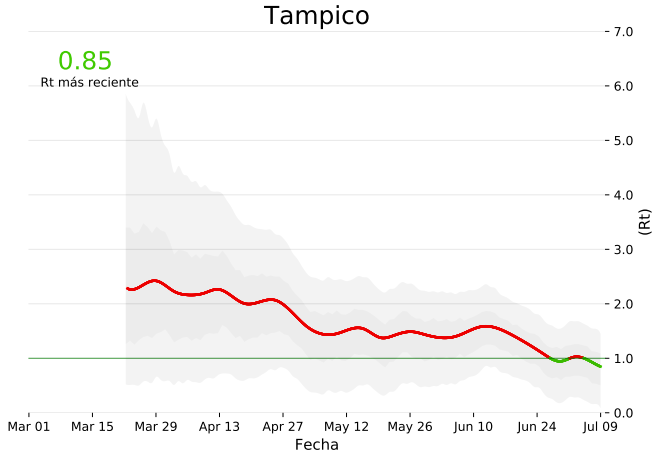
2591	casos totales
591	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
176.87	casos por 100mil habitantes
0.82 %	de casos a nivel nacional



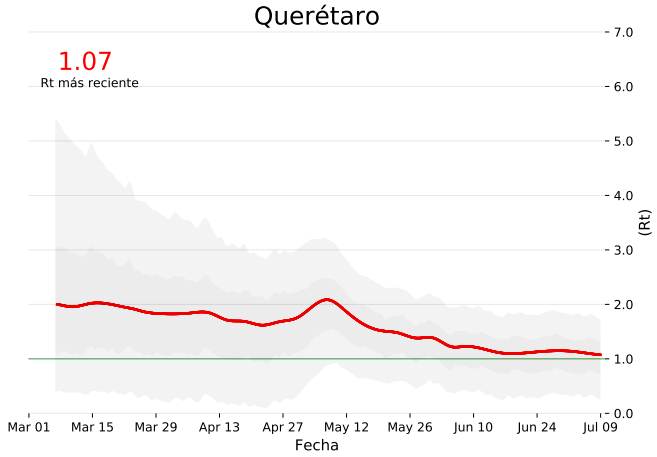
2499	casos totales
170	defunciones totales
2020-03-14	fecha de inicio
218.50	casos por 100mil habitantes
0.79 %	de casos a nivel nacional



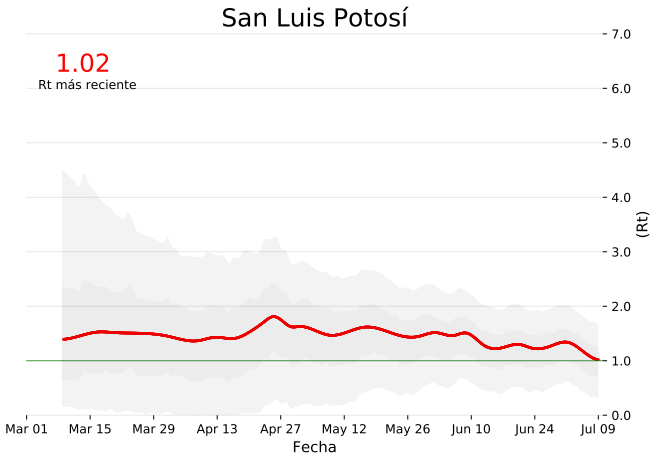
2432	casos totales
340	defunciones totales
2020-02-29	fecha de inicio
270.15	casos por 100mil habitantes
0.77 %	de casos a nivel nacional



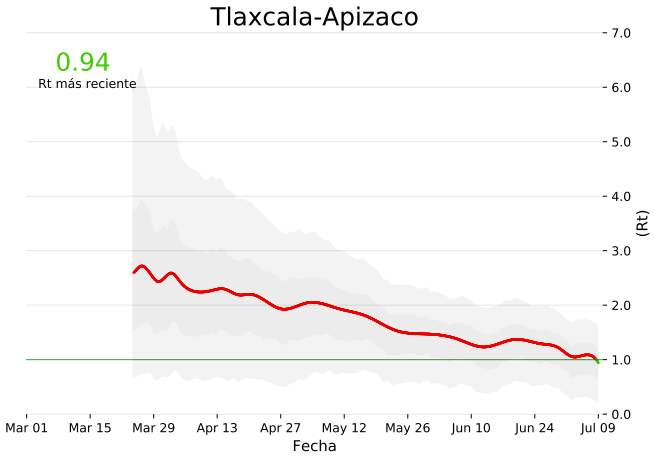
2374	casos totales
112	defunciones totales
2020-03-15	fecha de inicio
242.13	casos por 100mil habitantes
0.75 %	de casos a nivel nacional



2213	casos totales
285	defunciones totales
2020-03-10	fecha de inicio
149.71	casos por 100mil habitantes
0.70 %	de casos a nivel nacional



2089	casos totales
138	defunciones totales
2020-03-13	fecha de inicio
170.30	casos por 100mil habitantes
0.66 %	de casos a nivel nacional



2078	casos totales
246	defunciones totales
2020-03-23	fecha de inicio
354.18	casos por 100mil habitantes
0.65 %	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 15 de Julio de 2020

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.

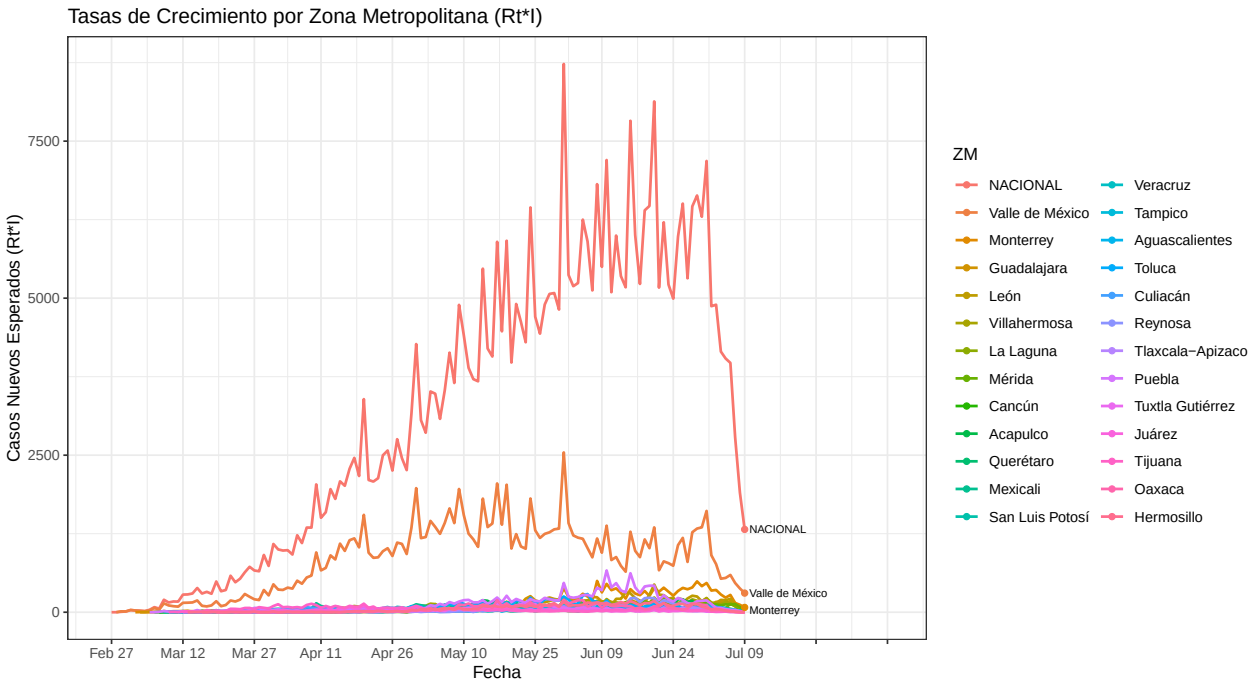


Fig. 3.1: Tasa de Crecimiento ($R_t * I$) por Zona Metropolitana.

4. Metodología de Estimación de R_t

4.1 Metodología para la Estimación del R_t.

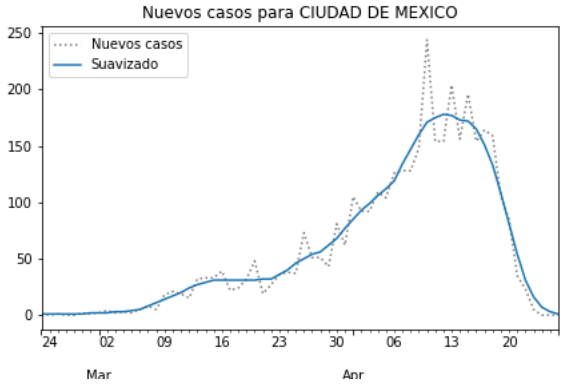
A continuación se resume la metodología utilizada para estimar el valor de la tasa de reproducción R_t cada día por Estados y Zonas Metropolitanas de la República Mexicana. La cual está basada en la propuesta del sitio *Estimating COVID-19's Rt in Real-Time* [1], que estima los valores de R_t para los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

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

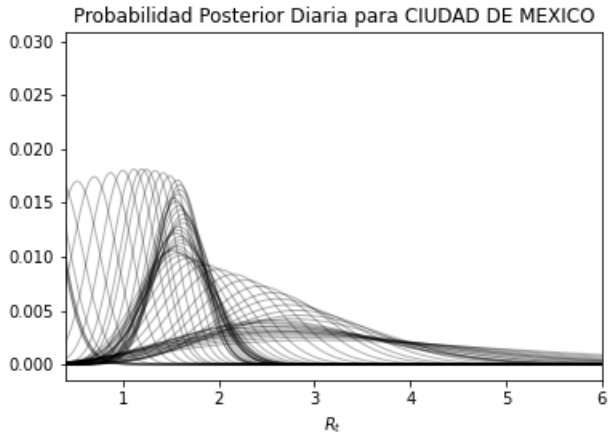
Para **la verosimilitud** $P(k|R_t)$ se propone una distribución Poisson:

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

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	1.5
BAJA CALIFORNIA	4.8
BAJA CALIFORNIA SUR	1.5
CAMPECHE	1.8
CHIAPAS	2.3
CHIHUAHUA	3.2
CIUDAD DE MÉXICO	6.9
COAHUILA	2.1
COLIMA	1.5
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	6.9
Puebla	3.1
Villahermosa	3.2
Monterrey	2.2
Guadalajara	2.3
León	2.2
Veracruz	3.0
La Laguna	2.1
Acapulco	2.2
Mérida	1.8
Tijuana	4.8
Oaxaca	1.9
Culiacán	5.0
Hermosillo	2.5
Cancún	2.5
Tuxtla Gutiérrez	2.3
Juárez	3.2
Aguascalientes	1.5
Reynosa	2.4
Tampico	2.4
Querétaro	1.7
Pachuca	2.2
Cuernavaca	2.8
San Luis Potosí	1.4
Tlaxcala-Apizaco	2.6

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/