

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

06 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.

*06 de Octubre de 2021*

# Tabla de Contenidos

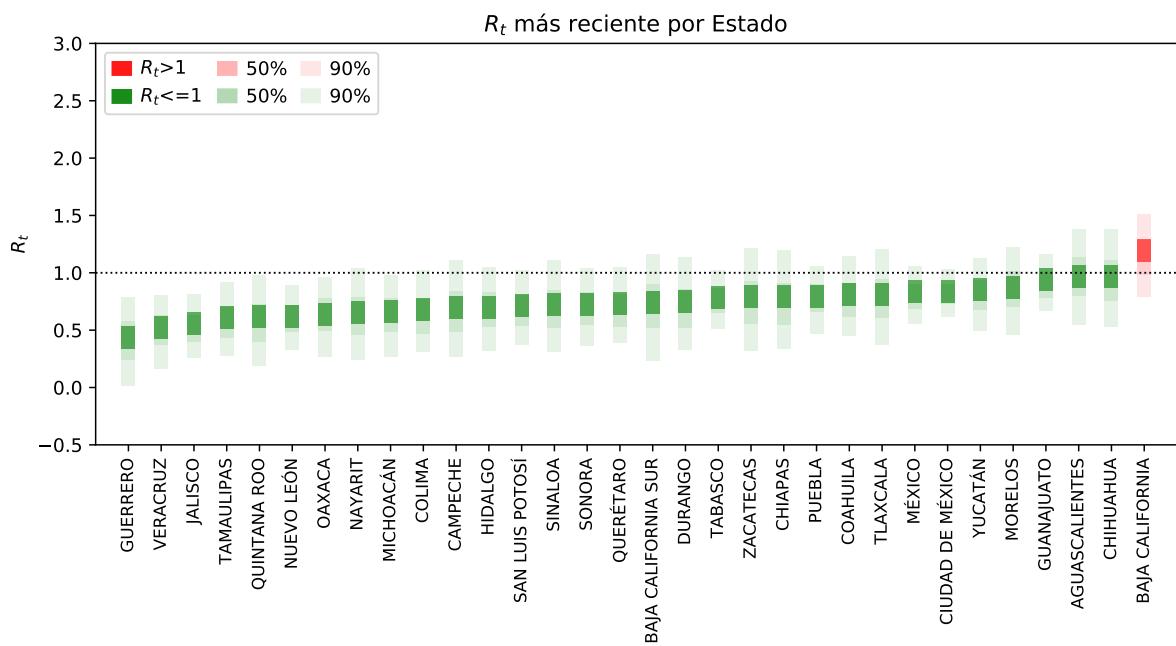
<b>1</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> en Orden Ascendente .....</b>	<b>4</b>
1.1	Estimaciones de $R_t$ por Estado en Orden Ascendente	5
1.2	Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana en Orden Ascendente	6
<b>2</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> por Estado .....</b>	<b>7</b>
2.1	Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado	19
<b>3</b>	<b>Estimaciones de <math>R_t</math> por Zona Metropolitana .....</b>	<b>20</b>
3.1	Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana	30
<b>4</b>	<b>Metodología de Estimación de <math>R_t</math> .....</b>	<b>31</b>
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 06 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 24 de Septiembre 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 %.

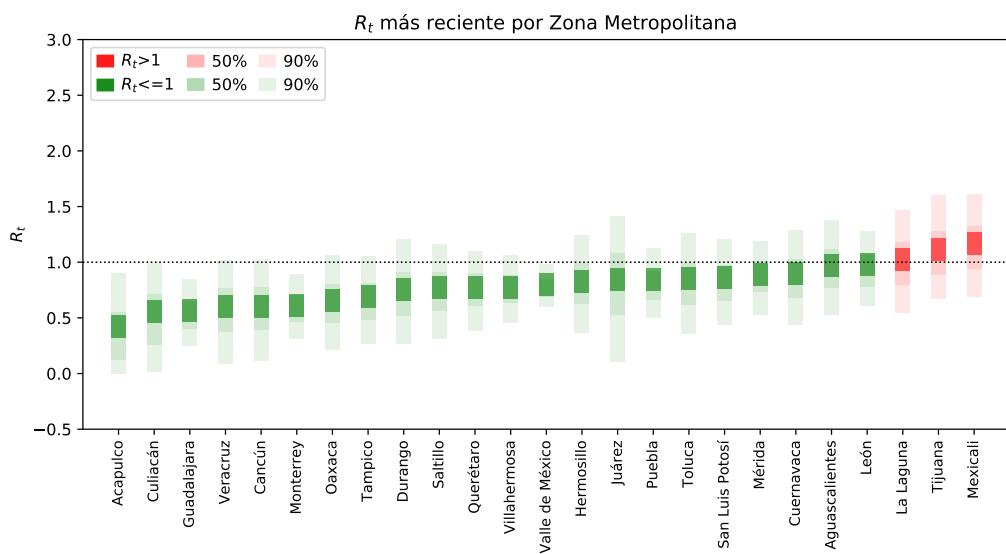


**Fig. 1.1:** Valor de  $R_t$  más reciente para los 32 estados de México.

## 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 06 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 24 de Septiembre 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.

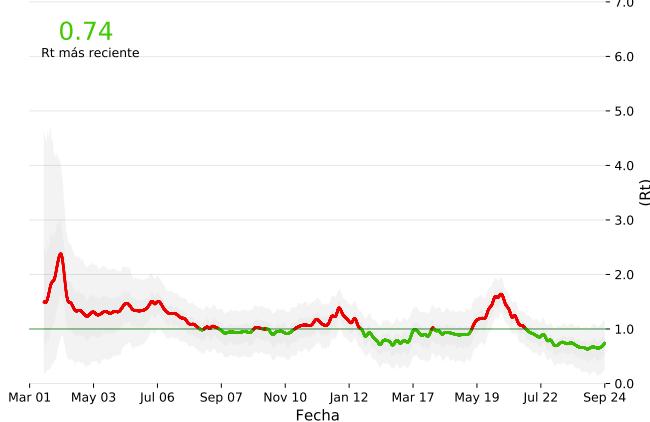
## **2. Estimaciones de $R_t$ por Estado**

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 06 de Octubre de 2021**

A continuación 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 24 de Septiembre de 2021.

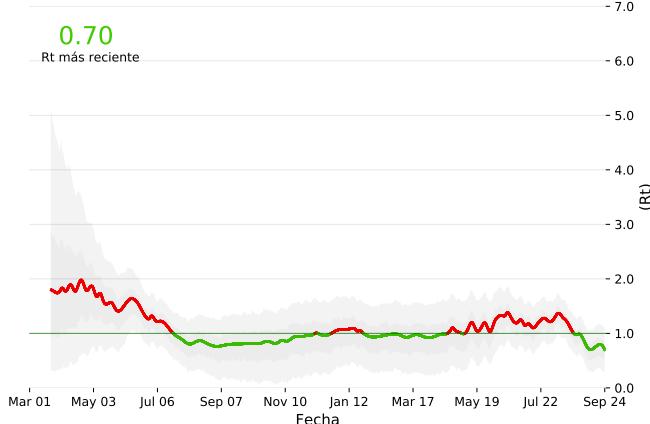


### BAJA CALIFORNIA SUR



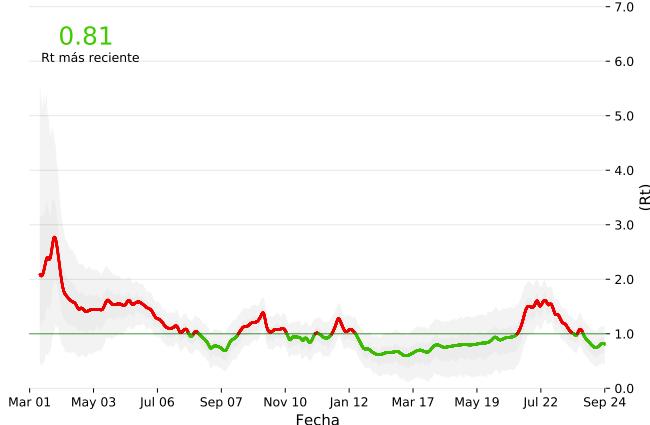
55460 casos totales  
2321 defunciones totales  
2020-03-18 fecha de inicio  
6891.94 casos por 100mil habitantes  
1.50 % de casos a nivel nacional

### CAMPECHE

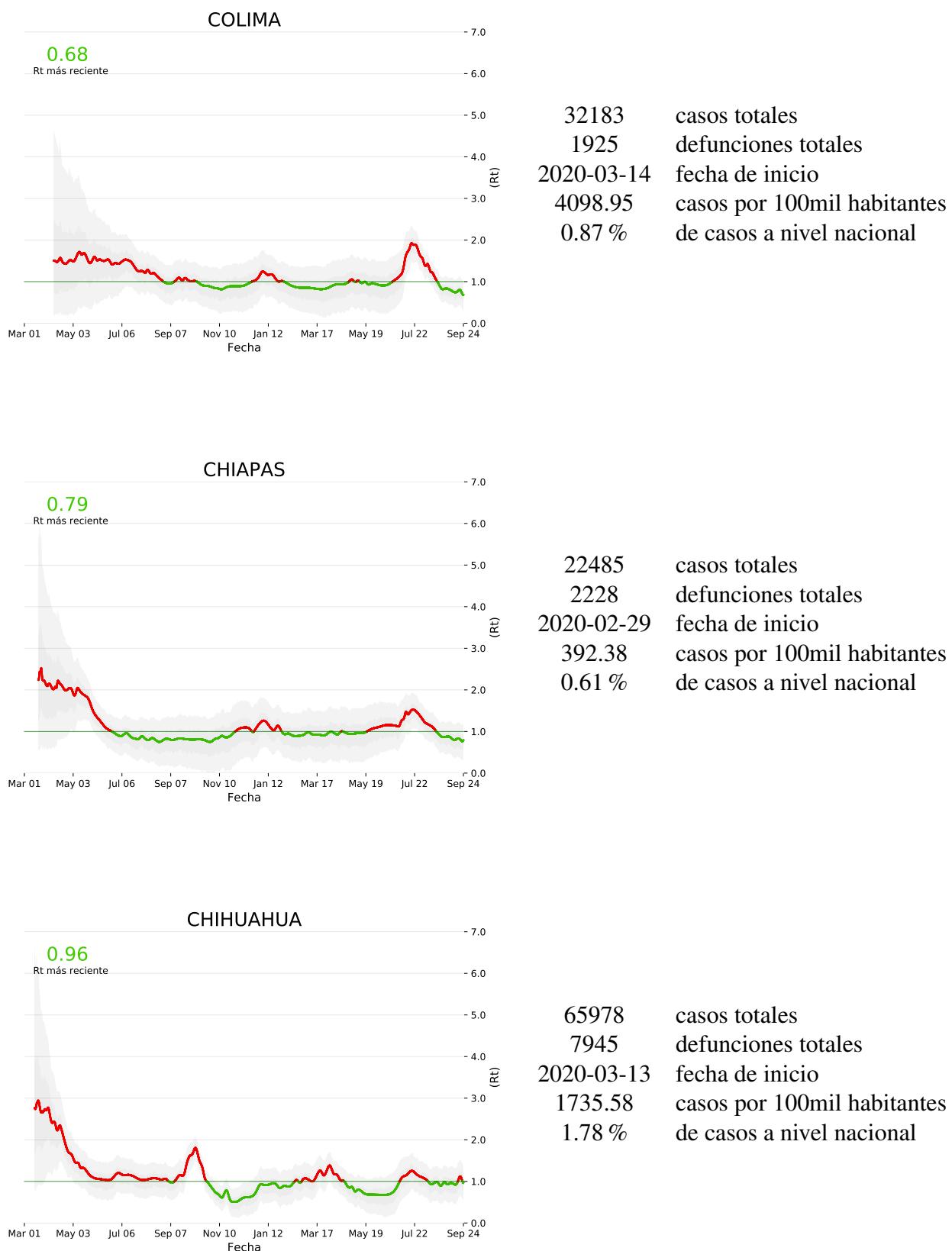


23131 casos totales  
1980 defunciones totales  
2020-03-08 fecha de inicio  
2311.67 casos por 100mil habitantes  
0.63 % de casos a nivel nacional

### COAHUILA

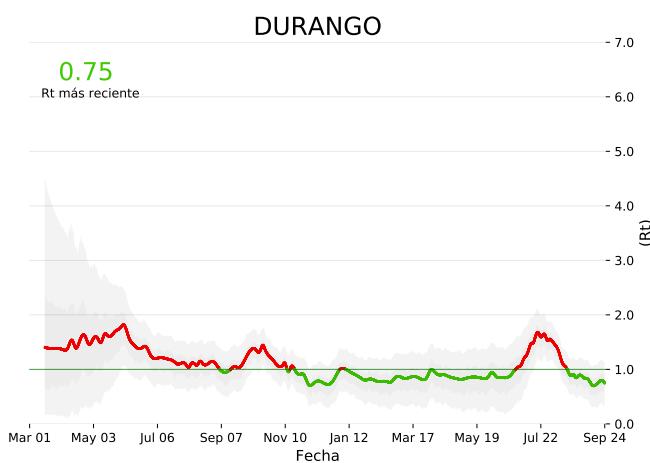


89856 casos totales  
7199 defunciones totales  
2020-02-28 fecha de inicio  
2791.67 casos por 100mil habitantes  
2.43 % de casos a nivel nacional





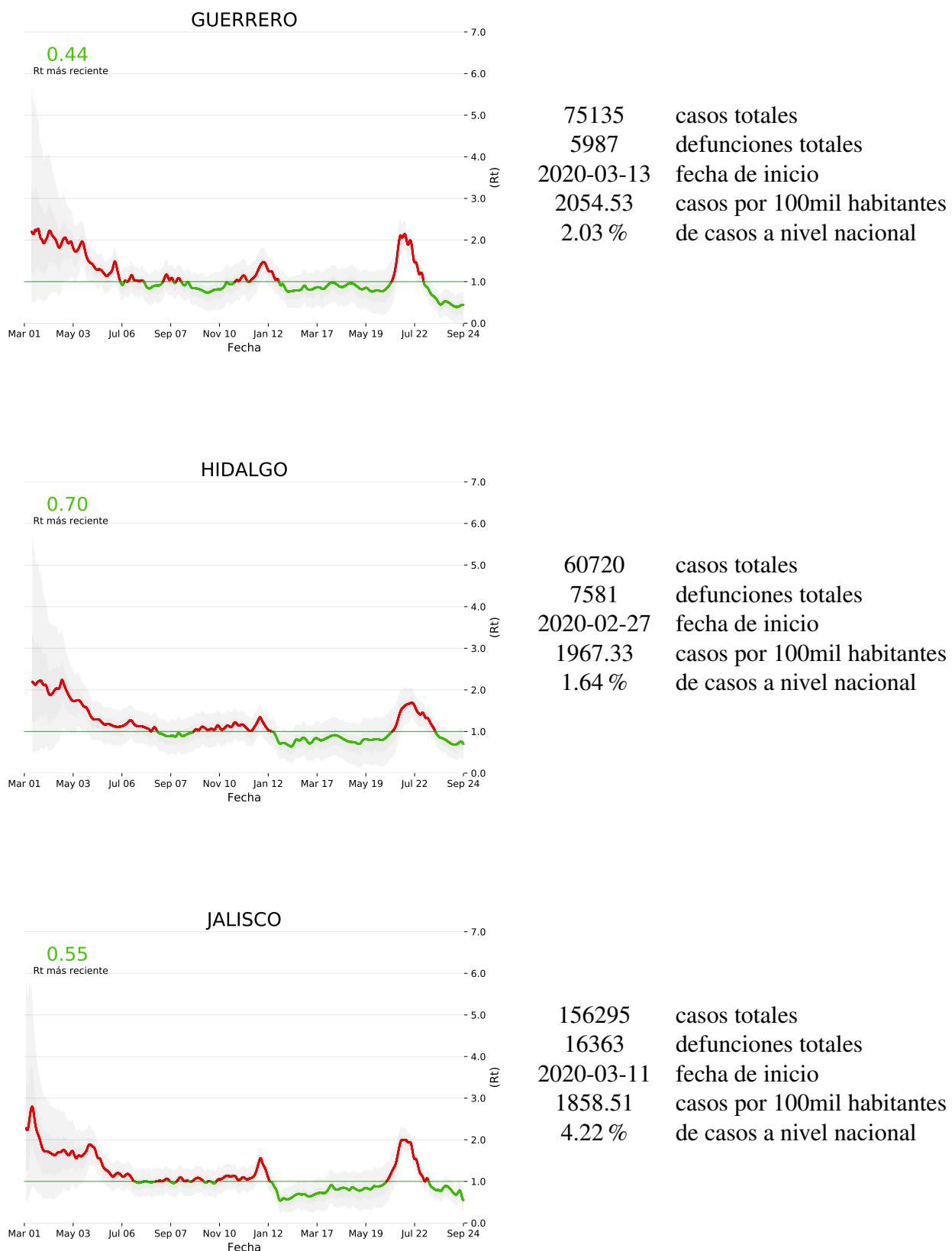
952610      casos totales  
 39359      defunciones totales  
 2020-02-27    fecha de inicio  
 10562.67     casos por 100mil habitantes  
 25.75 %      de casos a nivel nacional

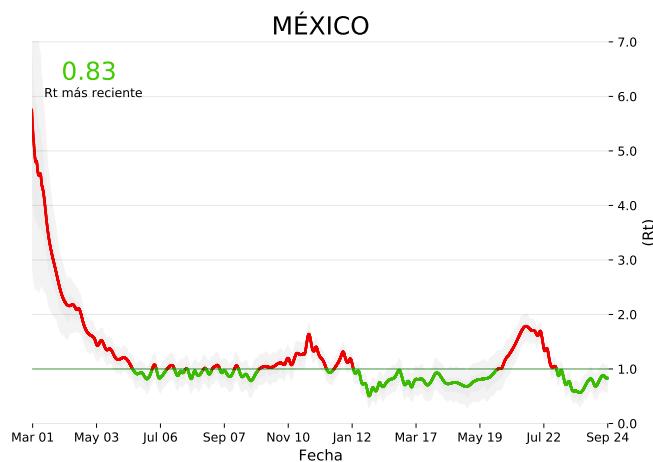


47634      casos totales  
 2979      defunciones totales  
 2020-03-11    fecha de inicio  
 2548.64     casos por 100mil habitantes  
 1.29 %      de casos a nivel nacional

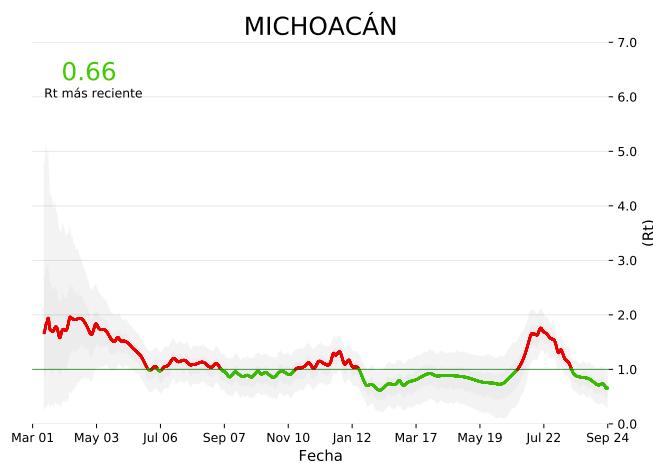


177416      casos totales  
 12179      defunciones totales  
 2020-03-01    fecha de inicio  
 2848.60     casos por 100mil habitantes  
 4.80 %      de casos a nivel nacional

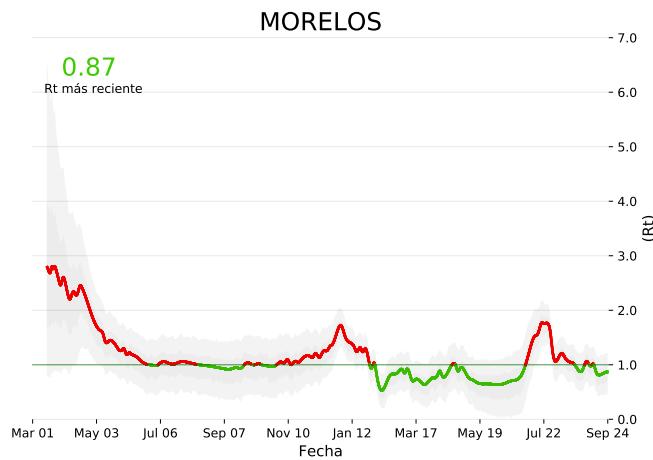




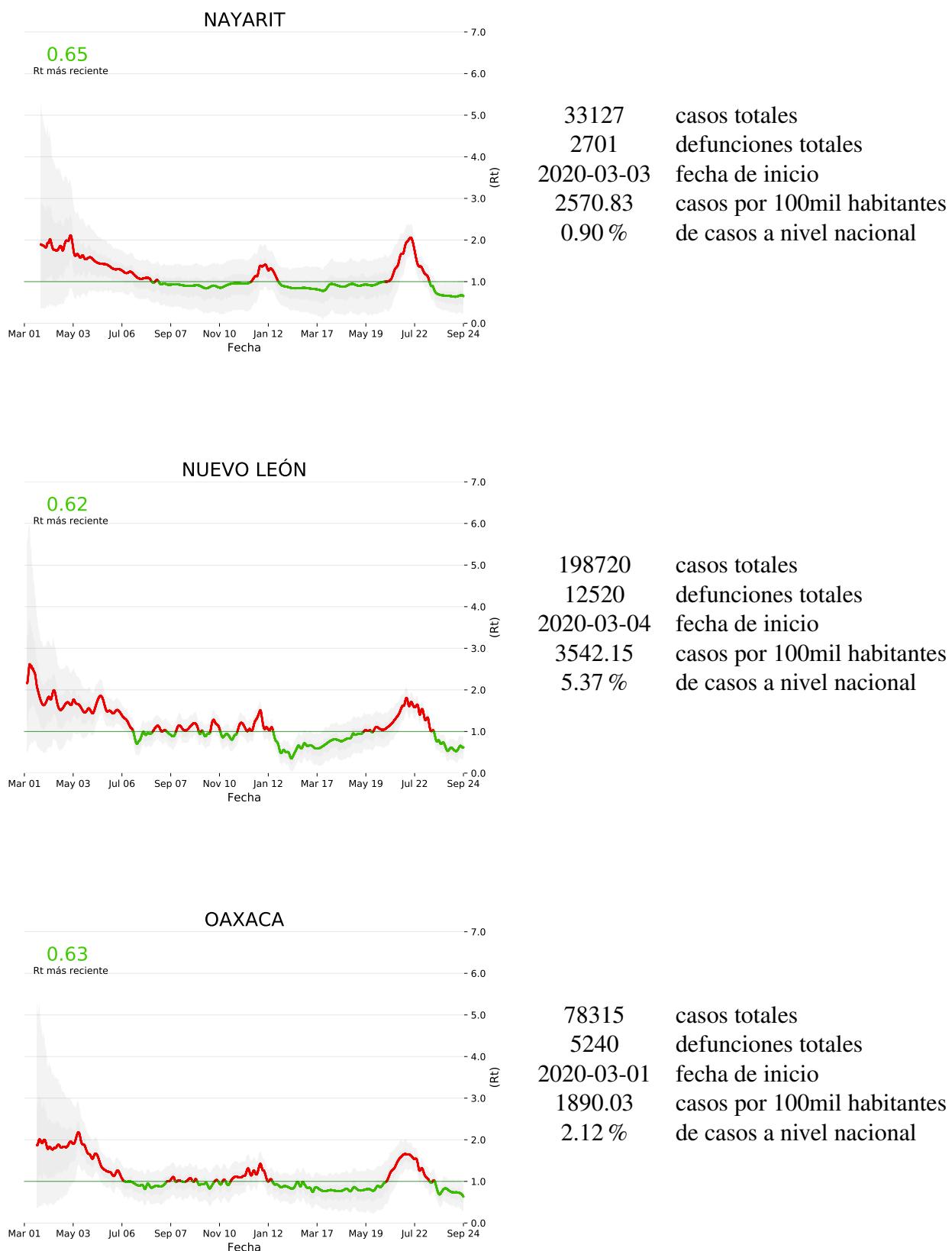
365149      casos totales  
 43200      defunciones totales  
 2020-02-27      fecha de inicio  
 2095.21      casos por 100mil habitantes  
 9.87 %      de casos a nivel nacional



71540      casos totales  
 7724      defunciones totales  
 2020-03-18      fecha de inicio  
 1482.57      casos por 100mil habitantes  
 1.93 %      de casos a nivel nacional

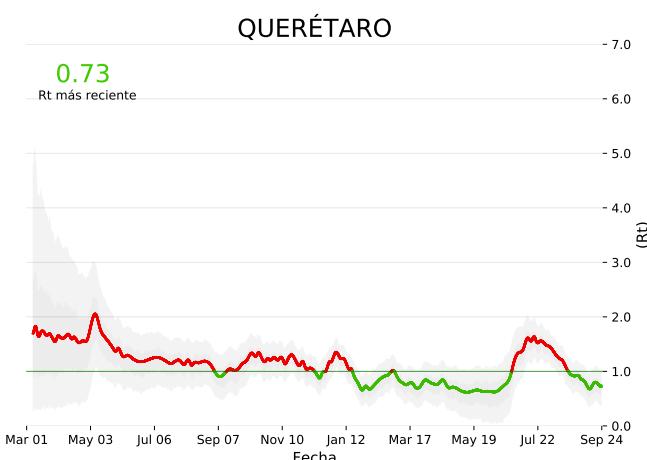


48621      casos totales  
 4563      defunciones totales  
 2020-03-09      fecha de inicio  
 2378.65      casos por 100mil habitantes  
 1.31 %      de casos a nivel nacional

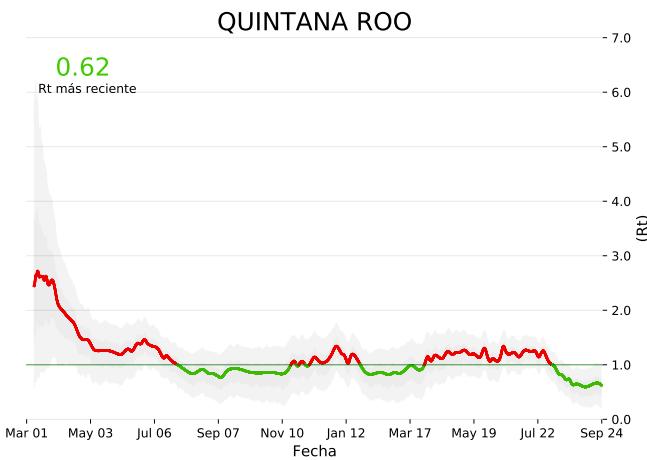




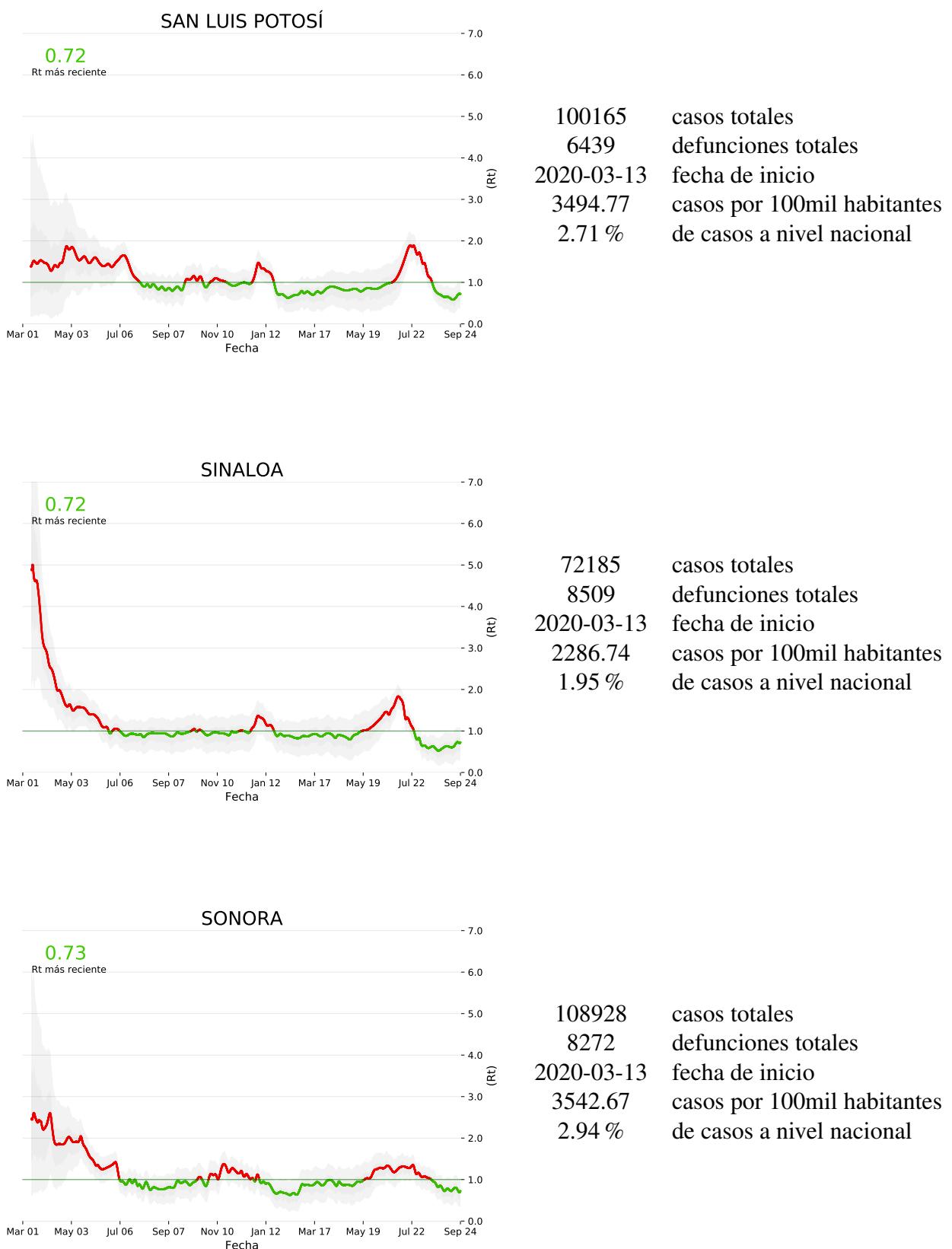
120773      casos totales  
 14707      defunciones totales  
 2020-03-11    fecha de inicio  
 1828.66     casos por 100mil habitantes  
 3.26 %      de casos a nivel nacional

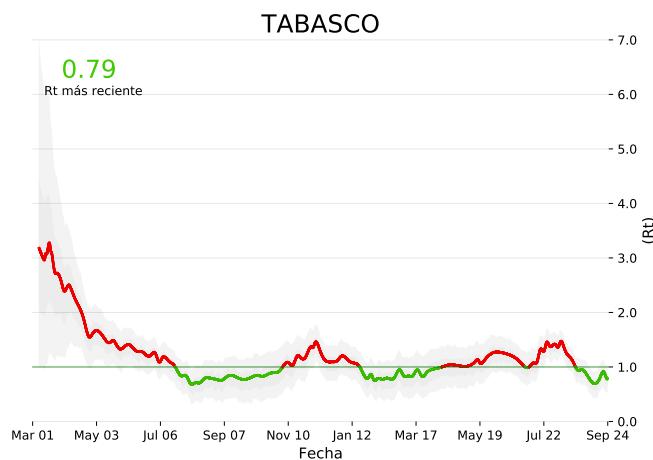


94300      casos totales  
 5353       defunciones totales  
 2020-03-10   fecha de inicio  
 4136.62     casos por 100mil habitantes  
 2.55 %      de casos a nivel nacional

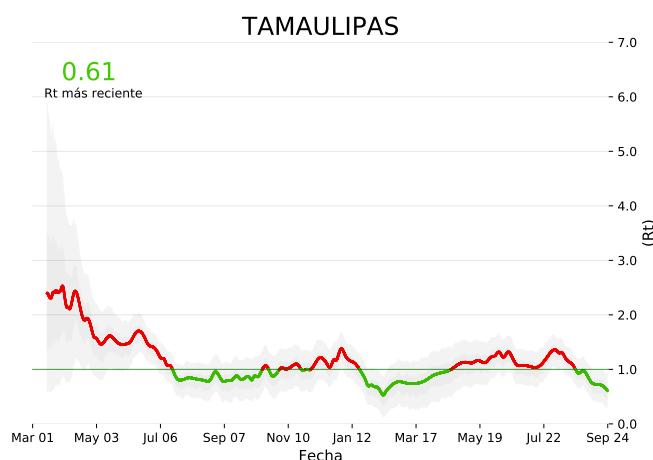


58338      casos totales  
 3986       defunciones totales  
 2020-03-11   fecha de inicio  
 3385.33     casos por 100mil habitantes  
 1.58 %      de casos a nivel nacional

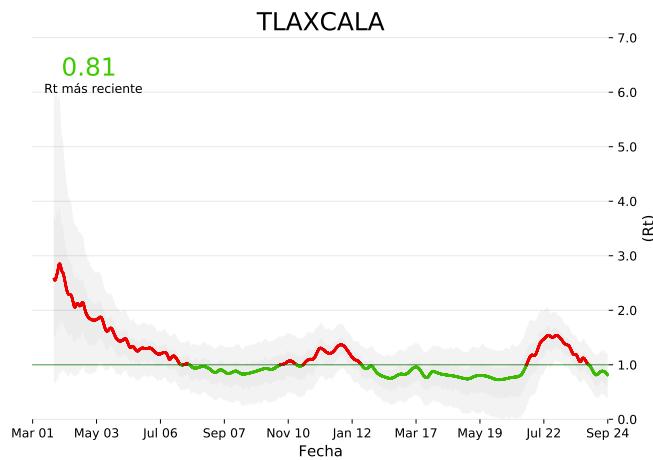




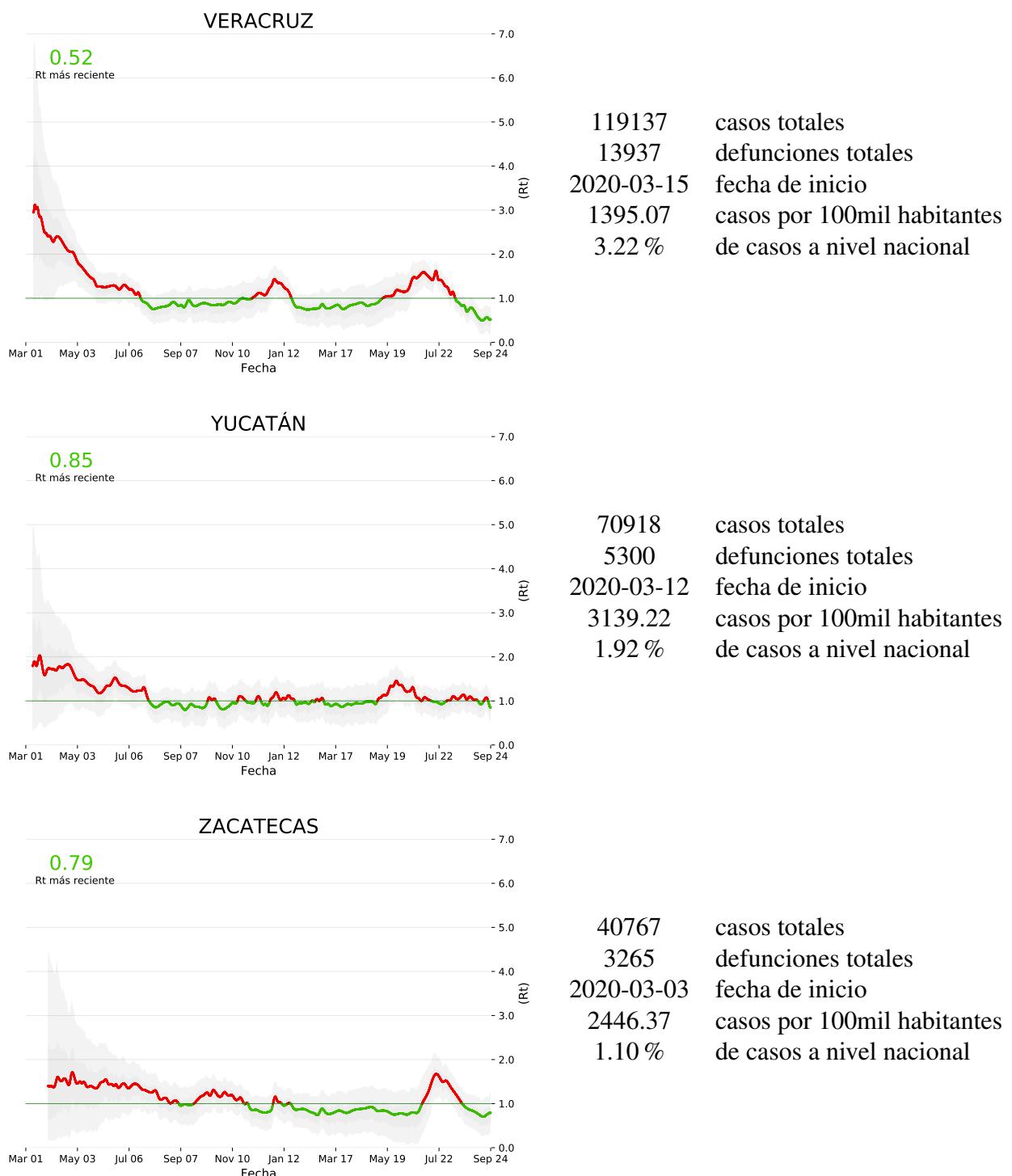
136643      casos totales  
 5257      defunciones totales  
 2020-03-04      fecha de inicio  
 5312.12      casos por 100mil habitantes  
 3.69 %      de casos a nivel nacional



98168      casos totales  
 6486      defunciones totales  
 2020-03-15      fecha de inicio  
 2689.09      casos por 100mil habitantes  
 2.65 %      de casos a nivel nacional



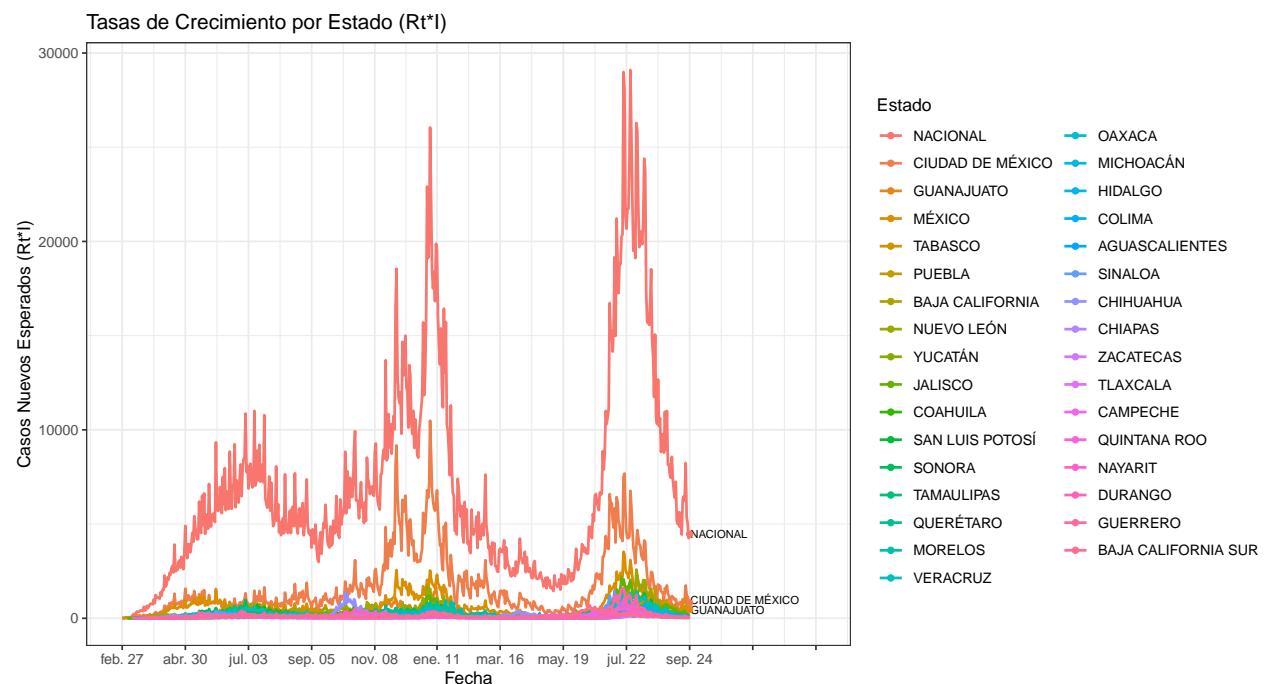
28661      casos totales  
 2885      defunciones totales  
 2020-03-06      fecha de inicio  
 2076.87      casos por 100mil habitantes  
 0.77 %      de casos a nivel nacional



## 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 06 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.



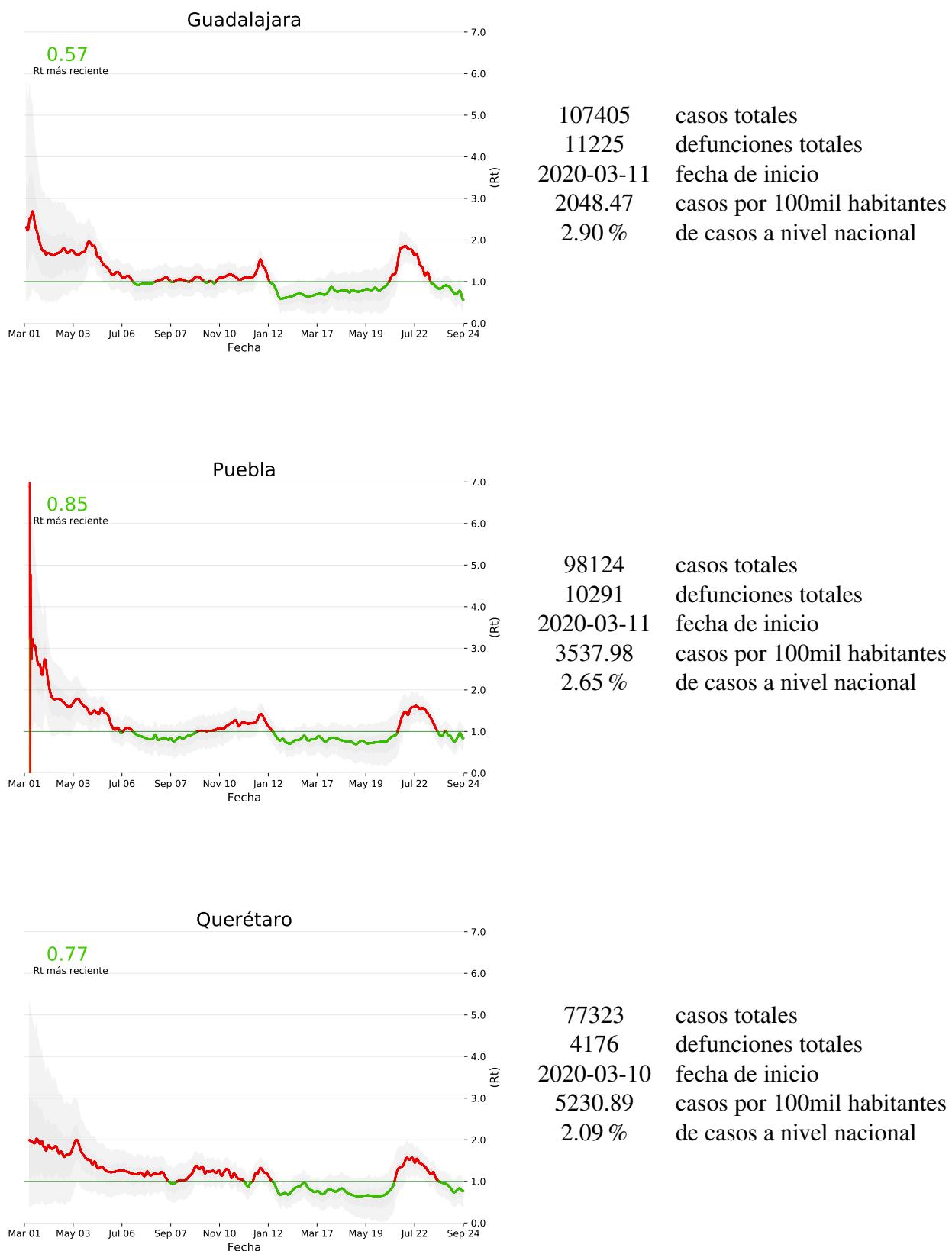
**Fig. 2.1:** Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Estado.

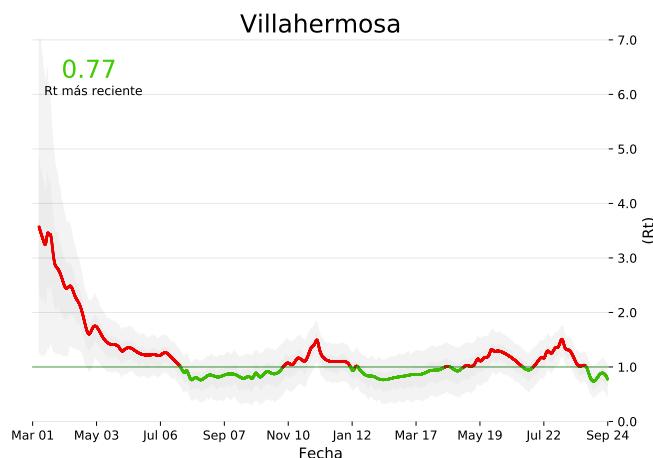
### **3. Estimaciones de $R_t$ por Zona Metropolitana**

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 06 de Octubre de 2021**

A continuación 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 24 de Septiembre de 2021.



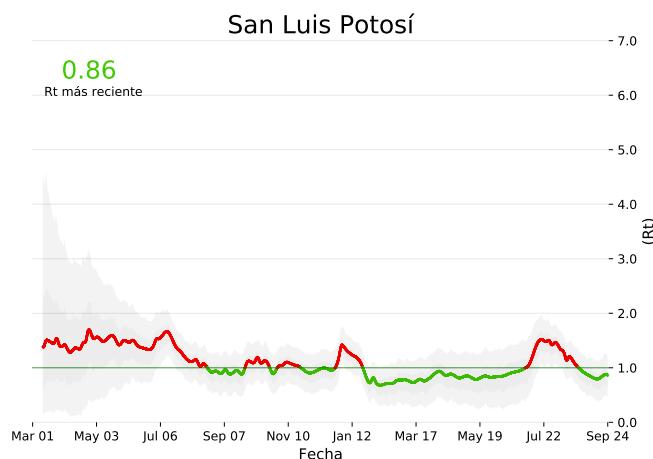




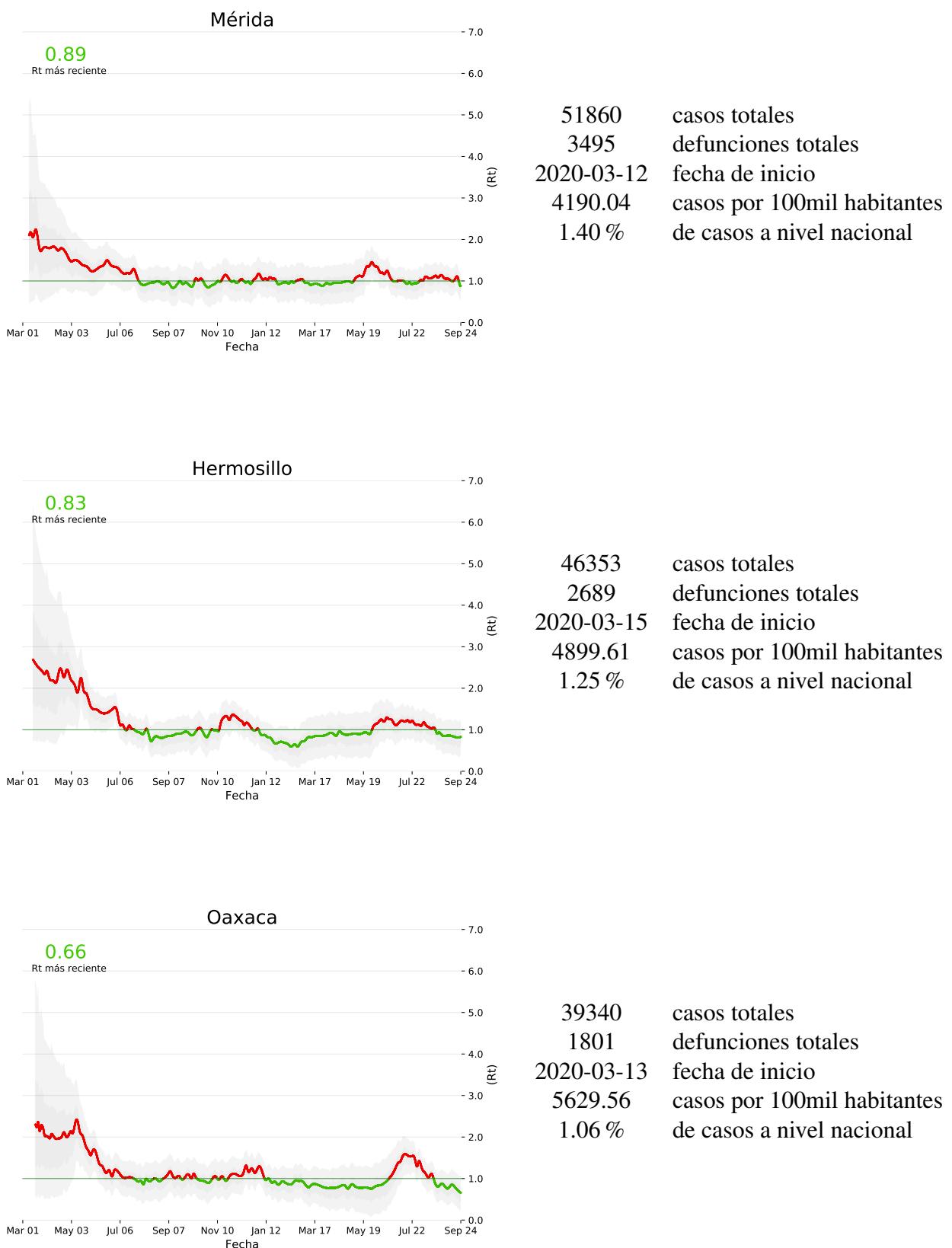
72579      casos totales  
 2551      defunciones totales  
 2020-03-04    fecha de inicio  
 8165.34     casos por 100mil habitantes  
 1.96 %      de casos a nivel nacional

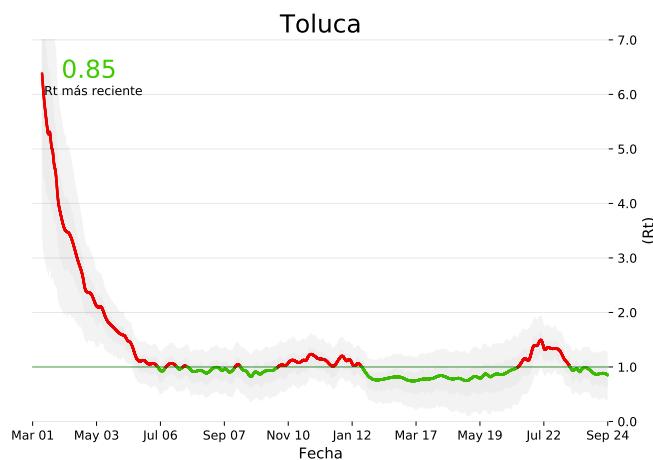


61808      casos totales  
 4772      defunciones totales  
 2020-03-01    fecha de inicio  
 3286.56     casos por 100mil habitantes  
 1.67 %      de casos a nivel nacional



58985      casos totales  
 3916      defunciones totales  
 2020-03-13    fecha de inicio  
 4808.47     casos por 100mil habitantes  
 1.59 %      de casos a nivel nacional

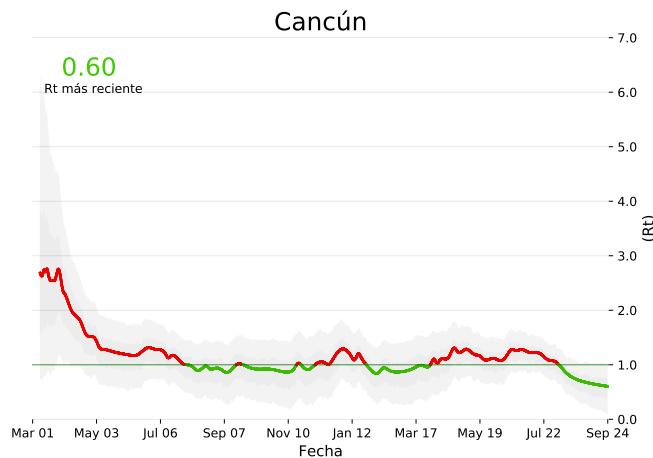




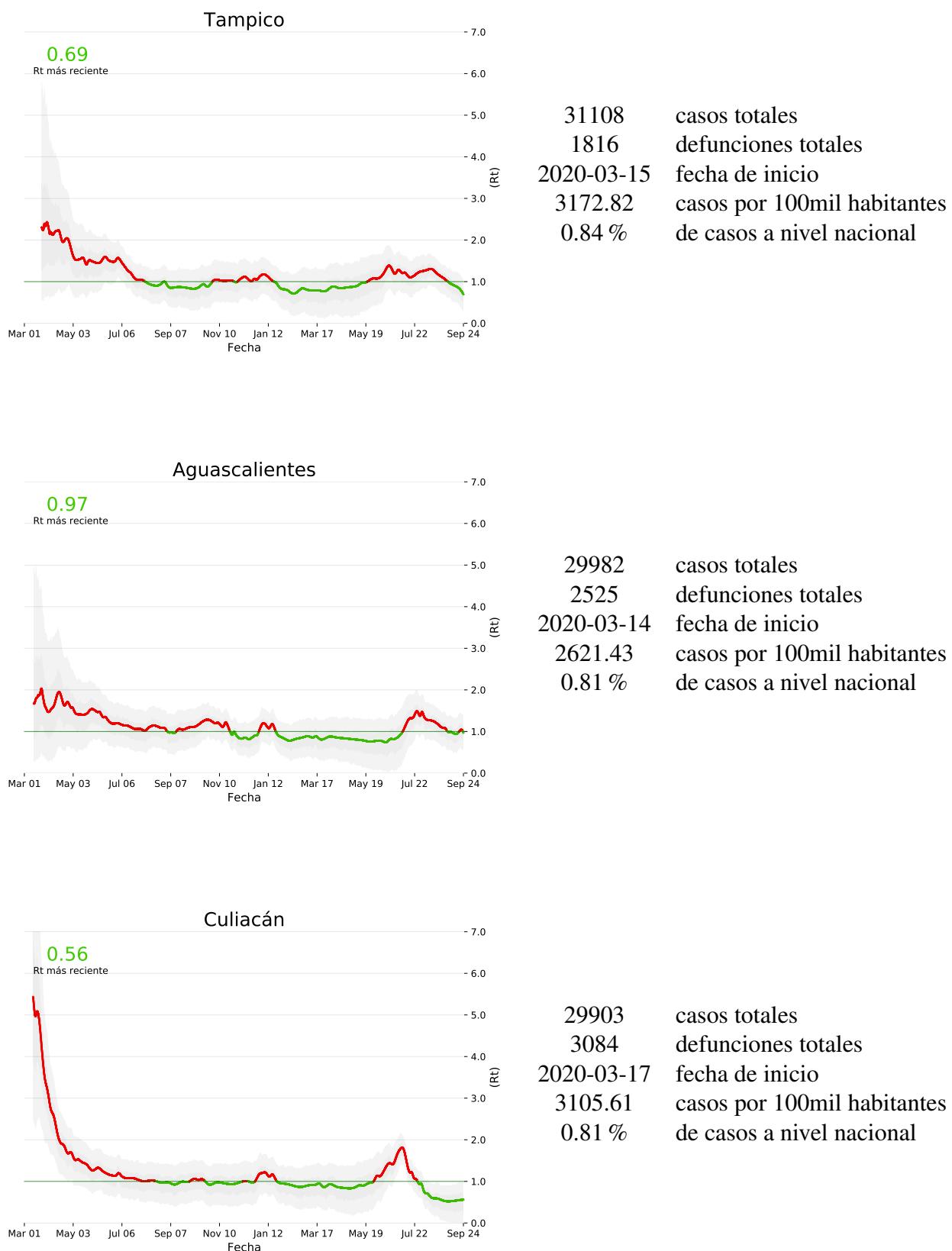
38913      casos totales  
 5585      defunciones totales  
 2020-03-03      fecha de inicio  
 1636.49      casos por 100mil habitantes  
 1.05 %      de casos a nivel nacional

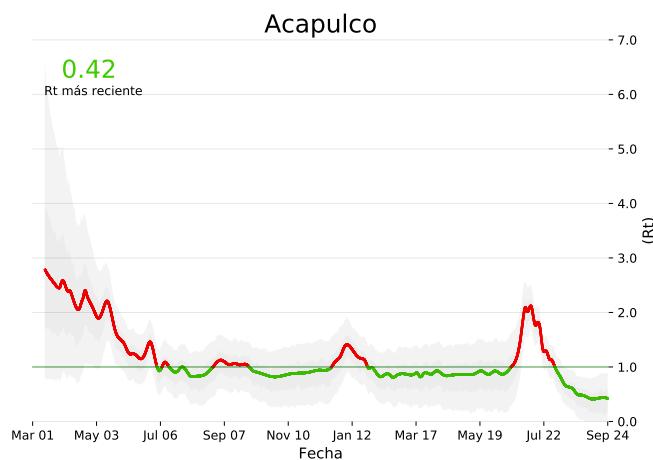


34723      casos totales  
 2965      defunciones totales  
 2020-02-28      fecha de inicio  
 2373.82      casos por 100mil habitantes  
 0.94 %      de casos a nivel nacional

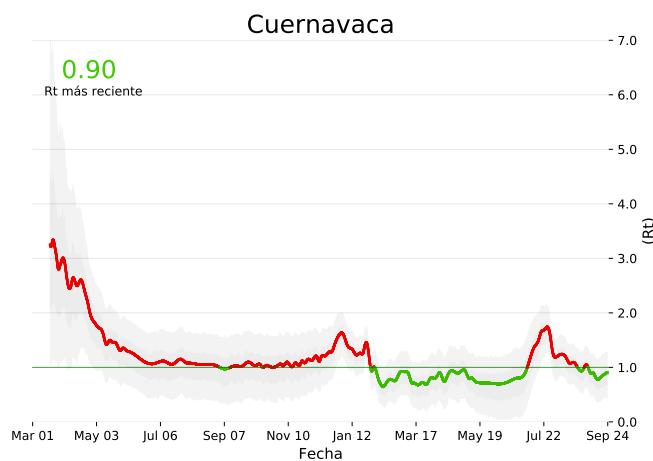


31453      casos totales  
 2513      defunciones totales  
 2020-03-12      fecha de inicio  
 3624.59      casos por 100mil habitantes  
 0.85 %      de casos a nivel nacional

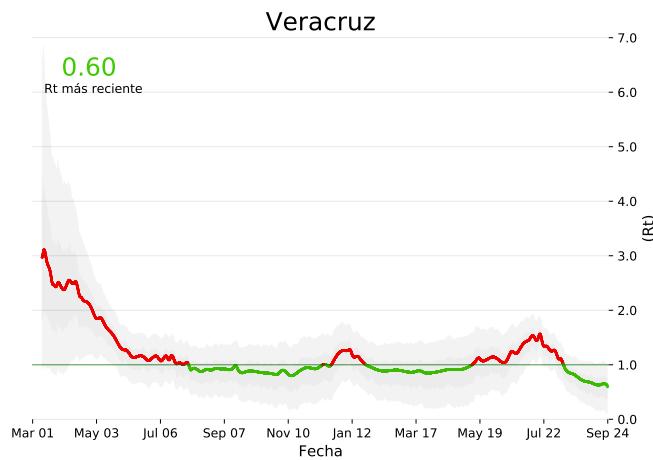




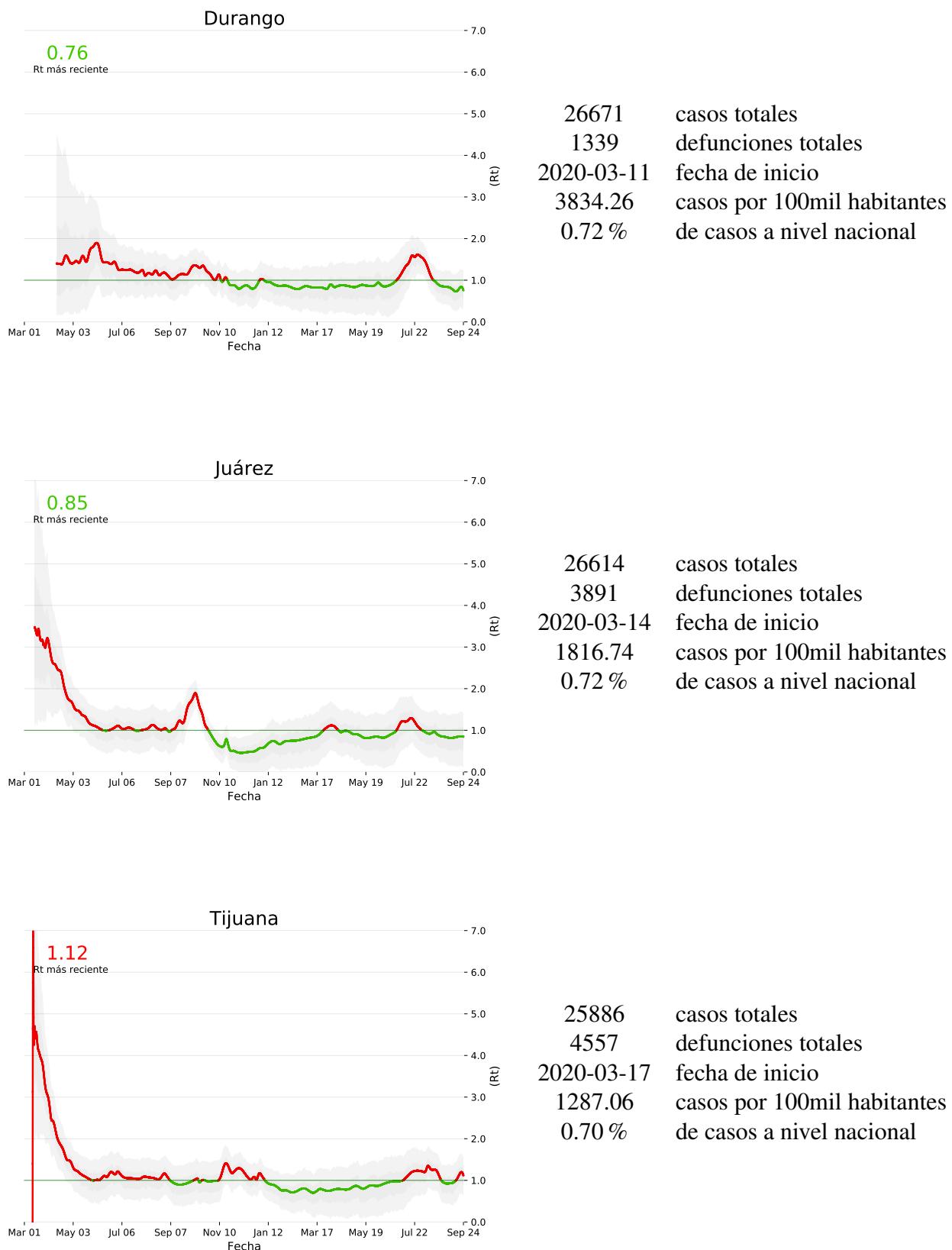
29521      casos totales  
 2747      defunciones totales  
 2020-03-13      fecha de inicio  
 3209.76      casos por 100mil habitantes  
 0.80 %      de casos a nivel nacional



29169      casos totales  
 2300      defunciones totales  
 2020-03-14      fecha de inicio  
 2753.04      casos por 100mil habitantes  
 0.79 %      de casos a nivel nacional



28099      casos totales  
 2805      defunciones totales  
 2020-03-15      fecha de inicio  
 2937.80      casos por 100mil habitantes  
 0.76 %      de casos a nivel nacional

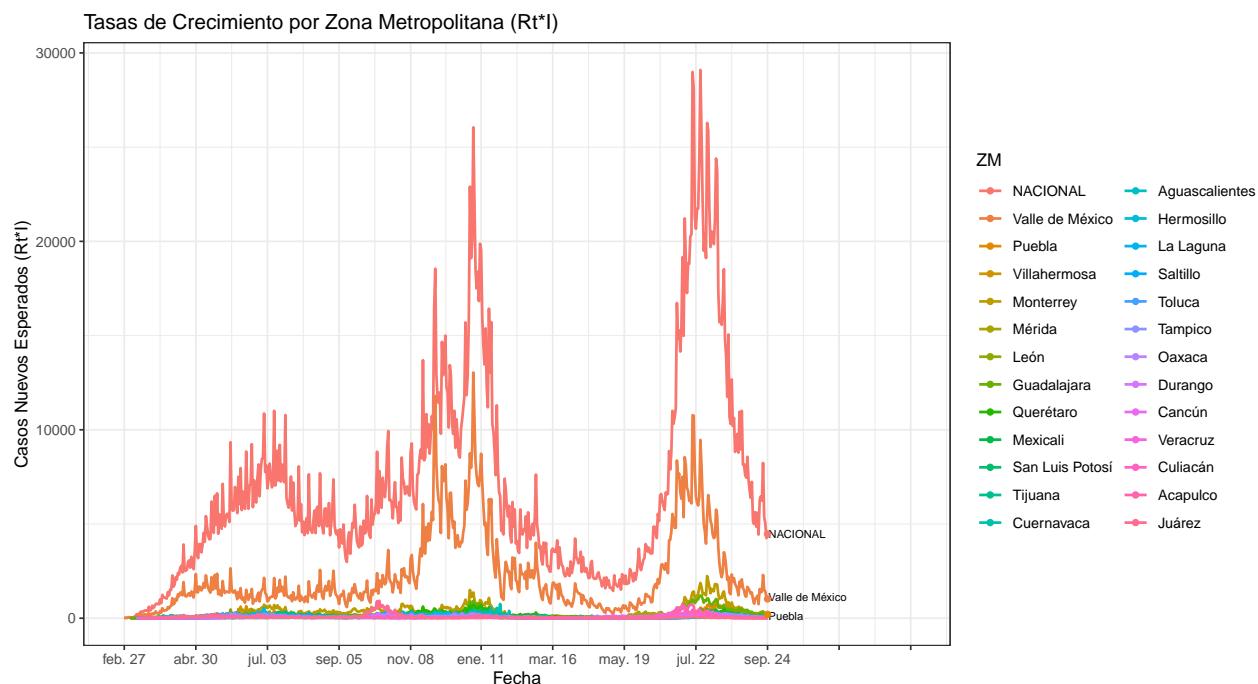




### 3.1 Tasa de Crecimiento ( $R_t * I$ ) por Zona Metropolitana

**Las estimaciones se obtuvieron a partir de los datos oficiales del Gobierno Federal al día 06 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 transmite 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 cuales 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:

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

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

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

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 intervalo 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  $\sigma$  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	$R_0$	Zona Metropolitana	$R_0$
AGUASCALIENTES	1.6	Valle de México	7.0
BAJA CALIFORNIA	4.8	Monterrey	2.0
BAJA CALIFORNIA SUR	1.5	Guadalajara	2.3
CAMPECHE	1.8	Puebla	3.3
COAHUILA	2.1	Querétaro	2.0
COLIMA	1.5	Villahermosa	3.6
CHIAPAS	2.3	León	2.5
CHIHUAHUA	2.8	San Luis Potosí	1.4
CIUDAD DE MÉXICO	7.0	Mérida	2.1
DURANGO	1.4	Hermosillo	2.7
GUANAJUATO	2.2	Oaxaca	2.3
GUERRERO	2.2	Toluca	6.5
HIDALGO	2.2	La Laguna	2.1
JALISCO	2.3	Cancún	2.7
MÉXICO	6.0	Tampico	2.3
MICHOACÁN	1.7	Aguascalientes	1.7
MORELOS	2.8	Culiacán	5.5
NAYARIT	1.9	Acapulco	2.8
NUEVO LEÓN	2.2	Cuernavaca	3.3
OAXACA	1.9	Veracruz	3.0
PUEBLA	3.1	Durango	1.4
QUERÉTARO	1.7	Juárez	3.5
QUINTANA ROO	2.5	Tijuana	4.8
SAN LUIS POTOSÍ	1.4	Saltillo	2.1
SINALOA	5.0	Mexicali	4.8
SONORA	2.5		
TABASCO	3.2		
TAMAULIPAS	2.4		
TLAXCALA	2.6		
VERACRUZ	3.0		
YUCATÁN	1.8		
ZACATECAS	1.4		

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.

	ML	Low_50	High_50	Low_90	High_90
date					
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-19'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/>