

## Modelování prostorového uspořádání s využitím prostorové autokorelace

(SPATIAL AUTOCORRELATION)

### Koncept prostorové autokorelace

Jak analýza kvadrátů tak analýza vzdálenosti nejbližšího souseda pracují pouze s polohou bodů. Nerozlišují body podle hodnot jejich atributů.

Oba parametry (polohu i atributy) hodnotí **prostorová autokorelace (SA)** – je tedy metodou vhodnější.

**Východiska prostorové autokorelace:** Většina jevů se v prostoru mění spojitě. Blízké body budou mít i podobné hodnoty studovaného jevu a naopak.

(First law of geography - Tobler, 1970)

### Prostorová autokorelace

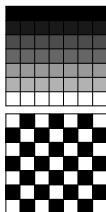
- Prostorová autokorelace udává, do jaké míry hodnoty atributu v určitém bodě souvisí či nesouvisí s hodnotami v bodech okolních

- **Pravidelné** uspořádání hodnot proměnné indikuje **vysokou** prostorovou autokorelaci

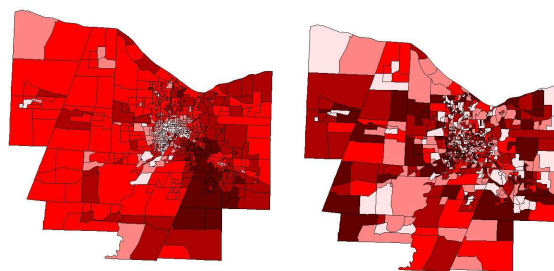
- **Náhodné** uspořádání bodů vykazuje **nízkou** prostorovou autokorelaci

- **Pozitivní prostorová autokorelace** – atributy sousedních či blízkých bodů mají podobné hodnoty

- **Negativní prostorová autokorelace** – atributy sousedních či blízkých bodů mají odlišné hodnoty



### Moranův index I - příklad



Průměrný příjem  
Moran's I: 0,66

Náhodná proměnná  
Moran's I: 0,012

### Koeficienty prostorové autokorelace

Míry prostorové autokorelace kombinují v jednom výrazu **míry podobnosti atributů** i **míry podobnosti polohy**.

Mezi nejpoužívanější koeficienty prostorové autokorelace náleží:

- **Gearyho poměr C (Geary's Ratio)**
- **Moranův index I (Moran's I)**

Lze jich využít pro intervalová a poměrová data.

Obě statistiky lze využít jako globální či lokální míry prostorové autokorelace

### Míry prostorové autokorelace

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} w_{ij}$$

$c_{ij}$  – podobnost atributu v bodech  $i$  a  $j$

$w_{ij}$  – podobnost polohy bodů  $i$  a  $j$ .  $w_{ii} = 0$  pro všechny body

$x_i$  – hodnota studovaného atributu v bodě  $i$

$n$  – počet bodů ve vyšetřovaném vzorku

### Koeficienty prostorové autokorelace

Koeficient prostorové autokorelace - SAC (spatial autocorrelation coefficient) je úměrný vážené míře podobnosti atributů bodů – obecně:

$$SAC \approx \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot w_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

### Gearyho poměr C:

V případě Gearyho poměru se podobnost hodnot atributu mezi dvěma body vypočte podle následujícího vztahu:

$$c_{ij} = (x_i - x_j)^2$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot w_{ij}}{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot \sigma^2} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_i - x_j)^2}{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot \sigma^2}$$

kde  $\sigma^2$  je rozptyl hodnot atributu  $x$  s průměrem  $\bar{x}$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$$

### Moranův index I

V případě **Moranova indexu** se podobnost hodnot atributu v bodech  $i$  a  $j$  vyjádří následovně:  $c_{ij} = (x_i - \bar{x}) \cdot (x_j - \bar{x})$

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot w_{ij}}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot (x_i - \bar{x}) \cdot (x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}}$$

kde  $s^2$  je v tomto případě výběrový rozptyl:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$$

### Definování míry podobnosti polohy bodů

Podobnost polohy bodů  $i$  a  $j$ , - hodnota  $w_{ij}$  - se určí jako inverzní hodnota vzdálenosti těchto bodů.

Tedy podle výše uvedených předpokladů dáváme malou váhu hodně vzdáleným bodům a velkou váhu bodům blízkým tedy:

$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}$$

### Obor hodnot koeficientů prostorové autokorelace

Rozdíly mezi oběma indexy jsou dány způsobem výpočtu rozdílů mezi hodnotami atributu. Obor hodnot, kterých mohou oba indexy nabývat se tedy také liší, jak uvádí následující tabulka:

Prostorové uspořádání	Gearyho poměr C	Moranův index I
Shlukové uspořádání, sousední body vykazují podobné hodnoty	$0 < C < 1$	$I > E(I)$
Náhodné uspořádání, body nevykazují znaky podobnosti	$C \sim 1$	$I \sim E(I)$
Pravidelné uspořádání, sousední body vykazují rozdílné charakteristiky	$1 < C < 2$	$I < E(I)$

kde  $E(I) = (-1)/(n-1)$  je očekávaná hodnota indexu

### Předpoklad náhodnosti a předpoklad normality

Při studiu prostorového uspořádání, můžeme předpokládat dva základní způsoby, kterými jsou atributy přiřazeny jednotlivým bodům.

- Předpoklad náhodnosti (randomization, nonfree sampling)** – předpokládáme, že hodnoty atributů v bodech představují pouze jednu z možných variant uspořádání při použití stejné množiny hodnot.
- Alternativně můžeme předpokládat, že hodnoty atributů v množině studovaných bodů jsou pouze jednou z nekonečného množství možností. Každá hodnota je nezávislá na hodnotách jiných v množině bodů – **předpoklad normality (normality, free sampling)**.

**Příklad:** Studovaná plocha obsahuje sedm bodů:

**Předpoklad náhodnosti** – může existovat pouze různá konfigurace 4 „černých“ a 3 „bílých“ bodů.

**Předpoklad normality** - může existovat různá konfigurace jakéhokoliv (0 až 7) „černých“ a „bílých“ bodů.

### Určení odhadů očekávaných hodnot

- Výše uvedené předpoklady náhodnosti (R) a normality (N) ovlivňují způsob výpočtu očekávaných (E – expected) hodnot i hodnot rozptylu.
- Očekávané hodnoty indexů a hodnoty rozptyly potřebujeme pro testování, zda se vypočtené hodnoty indexů C a I statisticky významně liší od náhodného uspořádání.

### Odhad očekávaných hodnot pro náhodné uspořádání (random pattern) a rozptyly pro Gearyho poměr C

$$E_N(C) = 1 \quad E_R(C) = 1$$

$$VAR_N(C) = \frac{(2S_1 + S_2)(n-1) - 4W^2}{2(n+1)W^2}$$

$$VAR_R(C) = \frac{(n-1)S_1[n^2 - 3n + 3 - (n-1)k]}{n(n-2)(n-3)W^2} - \frac{(n-1)S_2[n^2 + 3n - 6 - (n^2 - n + 2)k]}{4n(n-2)(n-3)W^2} + \frac{W^2[n^2 - 3 - (n-1)^2k]}{n(n-2)(n-3)W^2}$$

kde

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad S_1 = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (w_{ij} + w_{ji})^2}{2} \quad k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)^2}$$

$$S_2 = \sum_{i=1}^n (w_i + w_i')^2$$

### Odhad očekávaných hodnot Moranova indexu I a hodnot rozptylu pro náhodné uspořádání

$$E_N(I) = E_R(I) = \frac{-1}{n-1}$$

$$VAR_N(I) = \frac{(n^2 S_1 - n S_2 + 3W^2)}{W^2(n^2 - 1)} - [E_N(I)]^2$$

$$VAR_R(I) = \frac{n[(n^2 - 3n + 3)S_1 - nS_2 + 3W^2]}{(n-1)(n-2)(n-3)W^2} - \frac{k[(n^2 - n)S_1 - nS_2 + 3W^2]}{(n-1)(n-2)(n-3)W^2} - [E_R(I)]^2$$

### Určení standardizovaných hodnot

Máme-li vypočteny očekávané hodnoty indexů a jejich rozptyly, můžeme vyjádřit standardizované hodnoty (Z-skóre)

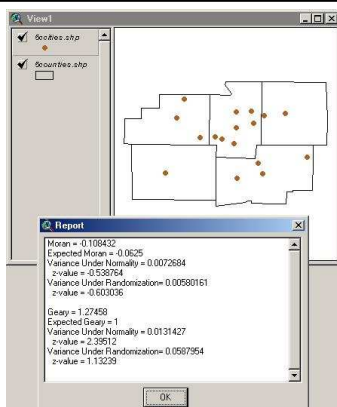
$$Z = \frac{I - E(I)}{VAR(I)}$$

nebo

$$Z = \frac{C - E(C)}{VAR(C)}$$

Pro hodnoty Z pak mohou být použity stejné kritické hodnoty, tedy na hladině významnosti  $\alpha=0,05$ :

$$-1,96 < Z < +1,96$$



### Interpretace hodnot koeficientů prostorové autokorelace:

Pokud zjištěné hodnoty z-skóre padnou vně intervalu (-1,96 ; +1,96), potom se prostorové uspořádání bodů statisticky významně liší (na hladině 5 %) od uspořádání náhodného.

Příklad výpočtu měr prostorové autokorelace

### Alternativy výpočtu

V uvedených vztazích lze modifikovat výrazy pro vyjádření podobnosti polohy. Hodnoty  $w_{ij}$  mohou nabývat binárních hodnot 0, 1 podle toho, zda jde o body sousední či nikoliv. Jako sousední body považujeme centroidy regionů, které obklopují daný region.

Modifikovat lze také váhy vzdálenosti bodů výrazem:

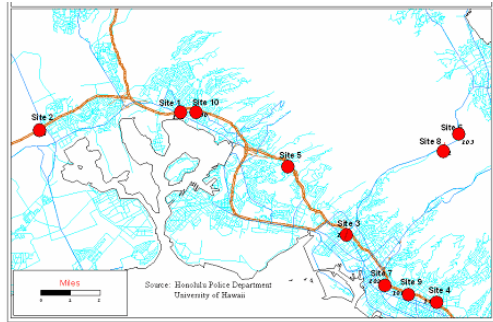
$$w_{ij} = \frac{1}{d_{ij}^b}$$

kde koeficient  $b$  může nabývat různých hodnot v závislosti na povaze studovaného problému (vzdálenost měřená dosažitelností autem a letadlem je jiná). Hodnota  $b$  je často rovna 2.

Uvedených koeficientů prostorové autokorelace lze využít pro výpočet podobnosti mezi polygony.

## Příklady použití měř prostorové autokorelace

1. Hledání příčin určitého prostorového rozložení jevů



**10 Highest Crash Frequency Intersections in Honolulu**  
(analýza lokálních a globálních vlivů)

## Crime analysis (prostorová analýza kriminality)

<http://www.ncjrs.gov/html/nij/mapping/index.html>

<http://www.icpsr.umich.edu/CRIMESTAT/>

Figure 4.17

A map showing domestic burglary hot spots and police perception in the Meadows area of Nottingham, United Kingdom.  
Source: Ratcliffe and McCullagh, 1998.  
Figure 1, p. 48.  
Reproduced by permission.

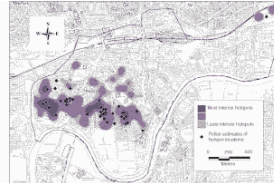
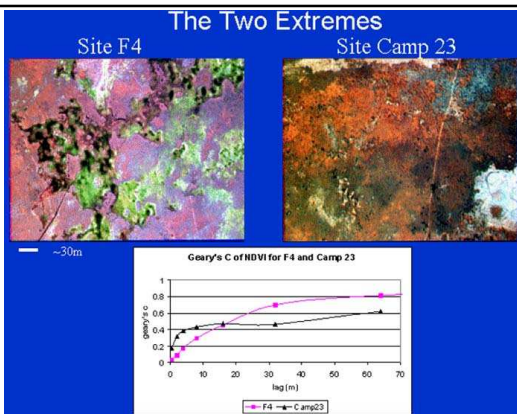
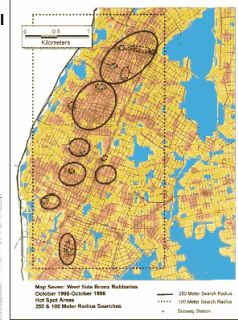


Figure 4.20

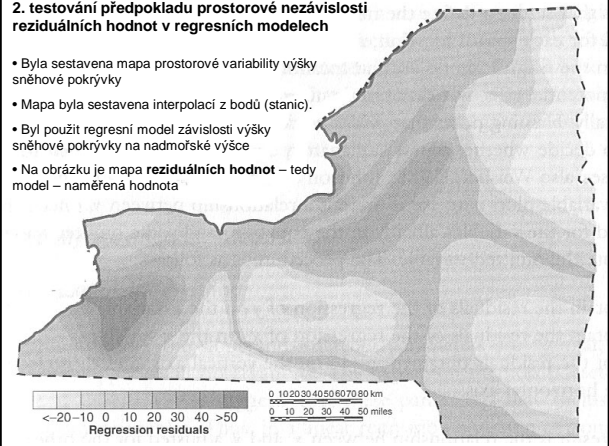
A map showing robbery hot spots, using STAC, West Bronx, New York.  
Source: Black and Black, 1997.  
Figure 7.  
Reproduced by permission.



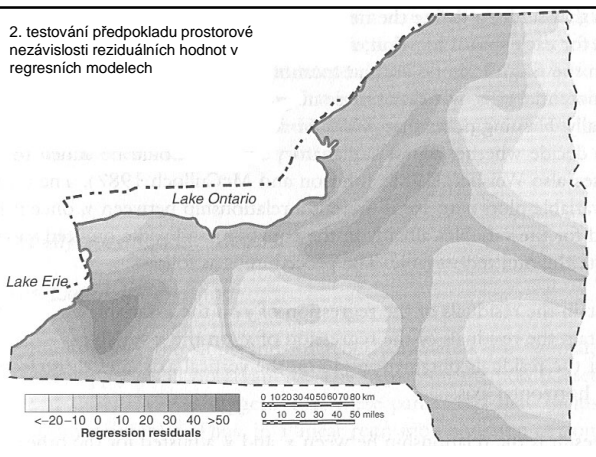
Využití měř prostorové autokorelace pro charakterizování struktury v krajinné ekologii

## 2. testování předpokladu prostorové nezávislosti reziduálních hodnot v regresních modelech

- Byla sestavena mapa prostorové variability výšky sněhové pokrývky
- Mapa byla sestavena interpolací z bodů (stanic).
- Byl použit regresní model závislosti výšky sněhové pokrývky na nadmořské výšce
- Na obrázku je mapa reziduálních hodnot – tedy model – naměřená hodnota

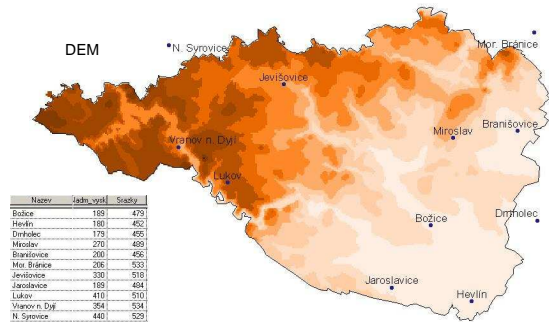


## 2. testování předpokladu prostorové nezávislosti reziduálních hodnot v regresních modelech

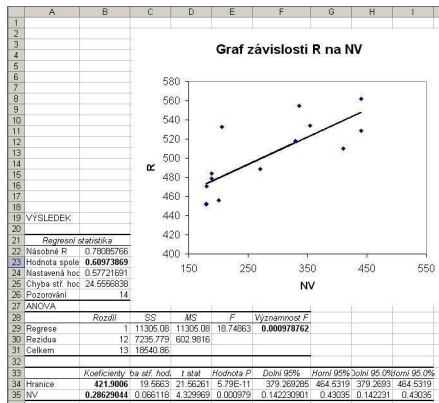


## Prostorová regrese

2. testování předpokladu prostorové nezávislosti reziduálních hodnot

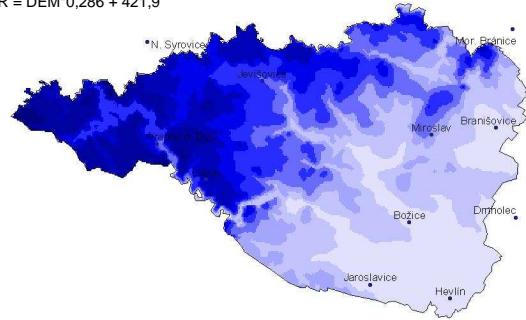


## Sestavení regresní závislosti



Pole srážek vytvořené pomocí regresního modelu

$$R = \text{DEM} \cdot 0,286 + 421,9$$



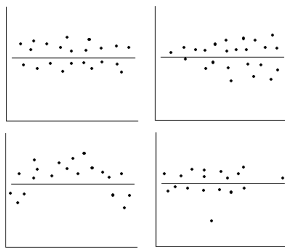
## Testování vhodnosti modelu

### Analýza reziduálních hodnot

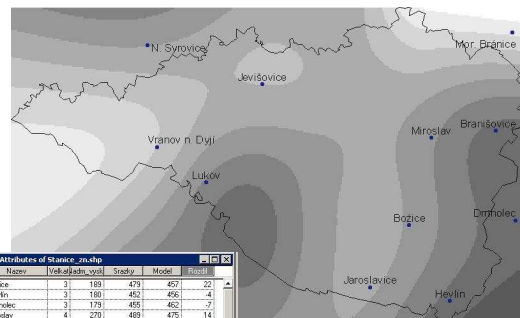
**Rezidua** jsou vzdálenosti skutečných hodnot  $y_i$  od modelem odhadnutých hodnot  $y_j$ .

Zvolený regresní model považujeme za vhodný, pokud reziduální hodnoty splňují všechny následující podmínky:

- rezidua jsou **náhodná a nezávislá**
- mají **normální rozdělení** s nulovým průměrem a konstantním rozptylem
- rozptyl reziduí je **konstantní**.

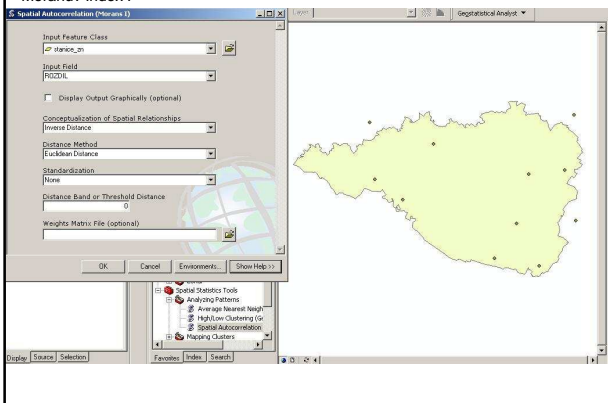


### Pole reziduálních hodnot



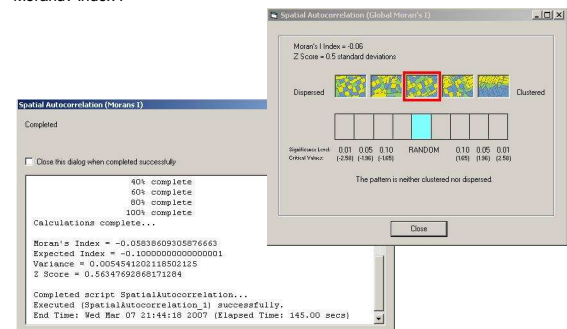
### Analýza prostorové autokorelace reziduálních hodnot

#### Moranův Index I



### Analýza prostorové autokorelace reziduálních hodnot

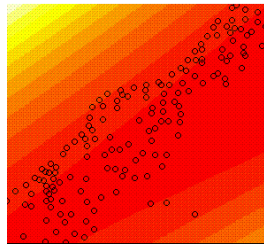
#### Moranův Index I



INTERPRETACE: Reziduální hodnoty jsou prostorově nezávislé, regresní model závislosti R na DEM je vhodný

## Jak interpretovat výsledek v případě prostorové závislosti reziduálních hodnot?

$$I \gg 0 \text{ nebo } I \ll 0$$



Možná řešení?

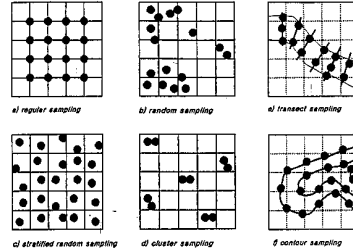
- **sampling (výběr vzorků) viz. dále**
- **další nezávisle proměnná**

$$Y = X1*a + X2*b + c$$

## Využití měř prostorové autokorelace bodů

3. SAMPLING (vzorkování) testování předpokladu prostorové nezávislosti výběru bodů pro následnou interpolaci

- řada interpolačních algoritmů vyžaduje nezávislost vstupních hodnot (náhodnost)
- tuto lze měřit měrami prostorové autokorelace

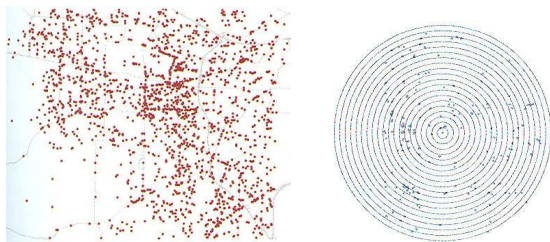


## Další míry prostorové závislosti

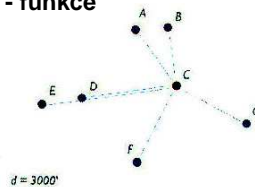
### K – funkce (Ripley's K function)

Zjišťuje celkový počet všech bodů, které se kolem bodu vyšetřovaného vyskytují do určité zvolené vzdálenosti

Je-li tento počet bodů větší než počet bodů, který by odpovídal náhodnému rozdělení, potom body jeví tendenci se shlukovat.



## K - funkce



$d = 3000'$

	A	B	C	D	E	F	G
A	988	2117	2494	3538	3858	4267	
B	988	1725	3348	4308	4004	3601	
C	2117	1725	2804	4034	2567	2309	
D	2494	3348	2804	1196	2510	4897	
E	3538	4308	4034	1196		3277	6034
F	3858	4004	2567	2510	3277		3433
G	4267	3601	2309	4897	6034	3433	

$$K(d) = \frac{A}{n^2} \sum_{i \neq j} I_{ij} d_{ij}$$

A – plocha území

n – počet bodů

d – vzdálenost (zvolený poloměr)

l – váha:  $l = 1$  pokud  $d_{ij} < d$   
 $l = 0$  pokud  $d_{ij} > d$

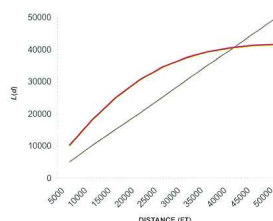
## Transformace K - funkce

$$L(d) = \sqrt{\frac{A \sum_{i \neq j} I_{ij} d_{ij}}{\pi n(n-1)}}$$



Interpretace:

- při zcela náhodném rozdělení bude přímka v grafu svírat s osou x úhel 45°
- Bude-li průběh přímky hodnot L vyšetřovaných bodů nad touto přímkou – tendence ke shlukování
- Bude-li průběh přímky hodnot L vyšetřovaných bodů pod touto přímkou – tendence k rovnoměrnému rozložení bodů



## Možnosti využití prostorové autokorelace

- popis a identifikace struktury, uspořádání, hledání příčin
- identifikace shluků, odlehých hodnot (viz. lokální míry)
- odhalení trendu v datech
- testování vhodnosti použitých regresních modelů
- princip vybraných metod interpolace